

TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Sähkövoimatekniikka

INSINÖÖRITYÖ

SÄHKÖKONEEN STAATTORIKÄÄMITYKSEN KEHITTÄMINEN

**Työn tekijä: Heikki Metsberg
Työn valvoja: Lehtori, DI Jari Ijäs
Työn ohjaaja: Teknologiajohtaja Jari Jäppinen**

Työ hyväksytty: 17.11.2006

**Jari Ijäs
lehtori, DI**

ALKULAUSE

Tämä insinöörityö tehtiin ABB Oy:n Pitäjänmäen konetehtaalle Tahtikoneet-tulosyksikölle. Haluan kiittää eristyslaboratorion koko henkilökuntaa arvokkaista neuvoista ja tuesta, jota sain työtä tehdessäni.

Kiitän myös niitä konetehtaan työntekijöitä, jotka auttoivat minua suorittamaan osan ko-keista.

Helsingissä 9.11.2006

Heikki Metsberg

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Heikki Metsberg	
Työn nimi: Sähkökoneen staattorikäämityksen kehittäminen	
Päivämäärä: 9.11.2006	Sivumäärä: 52 s.
Koulutusohjelma: Sähkötekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka
<p>Työn valvoja: lehtori Jari Ijäs</p> <p>Työn ohjaaja: teknologiajohtaja Jari Jäppinen</p>	
<p>Tämä insinöörityö tehtiin ABB:n Pitäjänmäen konetehtaalle Tahtikoneet-tulosyksikölle. Työssä tutkittiin mahdollisuuksia valmistaa murtovakovyhyhtejä kestopagneettituuligeneraattoreihin, joissa vakoluku on alle yhden.</p> <p>Työ tehtiin tutustumalla aluksi Pitäjänmäen konetehtaan käytössä oleviin vyyhden valmistus- ja käämintämenetelmiin. Lisäksi tutkittiin erilaisia mahdollisia murtovakovyhyhden valmistusmenetelmiä, joista lupaavimpia myös kokeiltiin.</p> <p>Saatujen kokemusten pohjalta valittiin vyyhden valmistusmenetelmä, jonka mukaan valmistettiin koe-erä. Koe-erälle suoritettiin mittauksia, joilla varmistettiin niiden sähköinen kestävyys</p> <p>Työn tuloksena valitulla valmistusmenetelmällä valmistettiin vyyhdet prototyyppi tuuligeneraattorin.</p>	
Avainsanat: tuuligeneraattori, tuulivoimala, staattorikäämitys, murtovakokäämitys, tahtikone.	

ABSTRACT

Name: Heikki Metsberg	
Title: Developing stator winding in electrical machines	
Date: 9.11.2006	Number of pages: 52
Department: Electrical engineering	Study Programme: Electrical power engineering
Instructor: Jari Ijäs, M. Sc. (El. Eng.)	
Supervisor: Jari Jäppinen, Technology Manager	
<p>This thesis was made to ABB's synchronous machines business unit in machines factory in Pitäjänmäki. Possibilities to manufacture fractional slot coils for permanent magnet wind turbine generators where slots per pole and phase would be less than one were studied.</p> <p>First normal winding method and coil manufacturing process used in ABB's Pitäjänmäki machines factory were familiarized. Also different manufacturing methods for fractional slot coils were studied, promising methods were also tested.</p> <p>Based on achieved experience the best methods were selected for production of coils. Batch of Sample coils were manufactured according to selected method. Series of tests were performed to sample coils to ensure electrical durability.</p> <p>As a result of the thesis, the methods of manufacturing were selected for prototype wind turbine generator coils.</p>	
Keywords: wind turbine generator, windmill, stator winding, fractional slot winding, synchronous machine.	

KÄSITTEET, LYHENTEET JA SYMBOLIT

KÄSITTEET, LYHENTEET

IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> , 1906 perustettu kansainvälinen standardisoimisjärjestö
Kelausaihio, lesti	tuki, jonka päälle vyyhti valmistetaan
Kierrosoikosulku	vyyhdin kahden vierekkäisen kierroksen välinen läpilyönti
Täytekerroin	suhdeluku, joka ilmaisee kuinka paljon käämitykselle käytettävissä olevasta tilasta sisältää tehollista käämitysjohtinta
Uraluku	roottori- tai staattoripaketin urien lukumäärä
Vakoluku	urien lukumäärä yhtä napaa ja vaihetta kohti
Vyyhden leveys, vyyhden askel	mitta, joka ilmoittaa vyyhden sivujen etäisyyden toisistaan, leveys voidaan ilmoittaa suhteessa napajakoon, tai absoluuttisesti urien lukumääränä
Vyyhtiryhmä	yhdestä tai useammasta vyyhdestä muodostuva kokonaisuus

SYMBOLIT

e	sähkömotorinen jännite
m	vaiheiden lukumäärä
N	käämikierrosten määrä
p	napapariluku
Q	uraluku
q	vakoluku
t	aika
Φ	magneettivuo

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

KÄSITTEET, LYHENTEET JA SYMBOLIT

1	JOHDANTO	1
2	SÄHKÖKONEEN RAKENNE	1
2.1	Roottori	3
2.1.1	<i>Induktiokoneen roottori</i>	3
2.1.2	<i>Tahtikoneen roottori</i>	4
2.2	Staattori	5
2.2.1	<i>Staattorin levypaketti</i>	5
2.2.2	<i>Staattorin käämitys</i>	7
3	ERISTEET	7
3.1	Johdineristeet	8
3.2	Pääeristeet	9
3.3	Kyllästys	10
4	TUULIGENERAATTORIT	10
4.1	Vakionopeuskäyttö	11
4.2	Pyörimisnopeussäädetty käyttö	12
4.3	Kaksoissyötetty käyttö	13
5	KESTOMAGNEETTIKONEET	14
6	SÄHKÖKONEEN KÄÄMITYS	15
6.1	Pyörimisnopeus ja vääntömomentti	15
6.2	Vakoluku	16
6.3	Käämikerroin	17

6.4	Jänteistys	20
6.4.1	<i>Askellyhennys</i>	21
6.4.2	<i>Vakovaihtelu</i>	21
6.4.3	<i>Vakosekoitus</i>	22
6.5	Vyöhykekerroin	23
6.6	Hammasmomentti - <i>cogging torque</i>	23
6.7	Virranahto	24
6.8	Murtovakokäämitys	26
7	2-KERROSLIMIVYYHDEN VALMISTUS	27
8	STAATTORIN KAKSIKERROSLIMIKÄÄMINTÄ	29
9	PROTOTYYPPIKONEEN MURTOVAKOVYYHDIN KEHITYS	32
9.1	Litz-lankavyyhdet	32
9.2	Kaksikerroslimikäämityksen kokeilu	33
9.3	Kelauskoe muotolangalla	34
9.4	Taivutuskoe muotolangalla	36
9.4.1	<i>Haulikylpykoestus</i>	37
9.4.2	<i>Puristuskoe</i>	41
9.5	Koevyyhtien valmistus ja koestus	42
9.5.1	<i>Syöksyaaltokoestus</i>	43
9.5.2	<i>Jännitekoe uraeristeelle</i>	47
9.5.3	<i>Vyyhden pään Eristysvastusmittaus</i>	48
10	PROTOTYYPPIKONEEN VYYHDEN VALMISTUS JA KÄÄMINTÄ	50
11	YHTEENVETO	51
	LÄHTEET	52

1 JOHDANTO

Tässä insinöörityössä on tavoitteena kehittää tahtikoneen staattorikäymistä. Erityisesti tarkoituksena on selvittää murtovakovyhtien valmistus- ja käymintämahdollisuuksia sekä niiden käyttöä kestopagneettitahtigeneraattorin staattorikäymisessä. Murtovakovyhden käytöllä on mahdollista muun muassa saavuttaa tila- ja materiaalisäästöjä, myös koneen häviöt on mahdollista saada pienemmiksi

Työssä käsitellään kämikäparijohtimen muotoilun ongelmia ja niiden ratkaisuja sekä vyhdenvalmistuksen ja tuotantomenetelmien valitsemista prototyyppituuligeneraattorille.

ABB Oy Sähkökoneet on osa kansainvälistä ABB-konsernia. Työ on tehty Helsingin Pitäjänmäen tehtaalle, Tahtikoneet tulostyksikölle. Tehtaalla valmistettavista tahtikoneista kasvava osa tulee osaksi tuulivoimalaa, jota varten 2006 perustettiin oma tulostyksikkö. Työssä valmistettava prototyyppikone tulee tuuligeneraattorikäyttöön.

Aluksi työssä tutustutaan käytössä oleviin vyhdin valmistusmenetelmiin, sekä kämminnän työvaiheisiin. Käytössä oleviin menetelmien tunteminen on tarpeellista, koska työssä pyritään löytämään valmistusmenetelmä joka on toteutettavissa mahdollisimman helposti jo olemassa olevilla koneilla ja laitteilla.

Työssä tutustutaan hyvin käytännönläheisesti eristetyn muotokuparijohtimen muokkautumisen ongelmiin suorittamalla johtimelle taivutus- ja muokkauskokeit.

2 SÄHKÖKONEEN RAKENNE

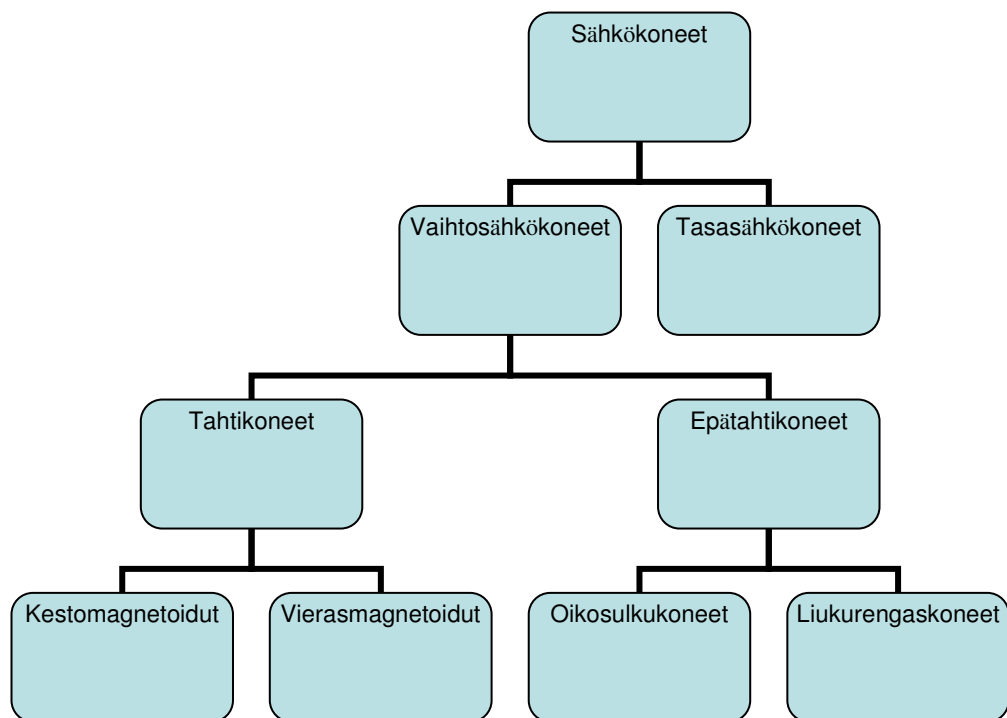
Sähkökoneeksi kutsutaan konetta tai laitetta jossa sähköenergiaa siirretään tai muunnetaan sähkömagneettisen induktion avulla. Sähkökoneita ovat muun muassa moottorit, generaattorit ja muuntajat. Työssä keskitytään tarkastelemaan pelkästään pyöriviä sähkökoneita eli moottoreita ja generaattoreita. Moottori ja generaattori määritellään pätötehon suunnan mukaan.

Pätötehon suunnan ollessa koneesta poispäin on kyseessä generaattori, moottorilla tehon suunta on koneeseen päin. [1, s. 15 s. 157.]

Pyörivä sähkökone (jäljempänä pelkkä sähkökone) koostuu karkeasti katsottuna kahdesta osasta. Paikallaan pysyvästä osasta, staattorista ja sen sisällä pyörivästä osasta, roottorista. Myös muunlaisia rakenteita on olemassa, mutta niiden käyttö rajoittuu hyvin kapea-alaisiin erikoissovelluksiin.

Sähkökoneet jaotellaan syöttävän sähköverkon mukaan tasasähkökoneisiin ja vaihtosähkökoneisiin. Tasasähkökoneet olivat aiemmin ainoa vaihtoehto kun koneelta vaadittiin tarkkaa vääntömomentin säätöä, mutta taajuusmuuttajien kehityksen myötä nykyään lähes kaikki tasasähkökoneet voitaisiin korvata vaihtosähkökoneilla.

Vaihtosähkökoneet jakautuvat kahteen ryhmään, tahtikoneisiin ja epätahtikoneisiin. Lisäksi kaikki vaihtosähkökoneet voidaan vielä jakaa liitántätavan mukaan yksi- ja kolmivaiheisiin. Vaiheiden lukumäärä voisi olla jokin muukin, mutta kolmivaiheisen jakeluverkon myötä lähes kaikki sähkökoneista ovat syötöltään joko yksi- tai kolmivaiheisia, näistä kolmivaiheisia on lukumääräisesti valtaosa.



Kuva 1. Sähkökoneiden karkea jaottelu

2.1 Roottori

Tyypillisesti roottori on sähkökoneen pyörivä osa johon kiinnitetty akseli välittää koneen vääntömomentin. Suurin ero tahti- ja epätahtikoneiden välillä on juuri roottorin rakenteessa.

Roottori muodostuu magneettivuota hyvin johtavasta levypaketista tai irtonavoista. Sen lisäksi tarvitaan magneettikentän muodostava käämitys tai kestopagneetit. Kestomagneettisovellukset ovat tyypillisesti rajoittuneet pienitehoisiin koneisiin, mutta magneettimateriaalien kehityksen myötä niidenkin tehot ovat kasvaneet.

2.1.1 Induktiokoneen roottori

Sähkökoneiden toimintaperiaatteen mukaan koneen toiminta edellyttää magneettikentän ja käämityksen vuorovaikutusta. Vuorovaikutus syntyy esimerkiksi kun magneettikenttä liikkuu suhteessa käämiin tai toisinpäin. Tällöin käämiin indusoituu sähkömotorinen voima. Edellä kuvattu on nimeltään induktioreaktio joka on perustana kaikissa sähkökoneissa.

Roottorin käämiin indusoitunut sähkömotorinen voima muodostaa jännitteen joka pääsee oikosulkeutumaan roottorin oikosulkurenkaiden kautta. Näin syntynyt (oikosulku)virta muodostaa roottoriin magneettikentän joka pyrkii tarrautumaan kiinni staattorin pyörivään magneettikenttään.

Koska roottorin käämityksen virta indusoituu staattorikentästä ja induktioreaktio edellyttää magneettikentän liikkumista suhteessa roottorin käämitykseen, ei roottori voi saavuttaa moottorikäytössä staattorikentän pyörimisnopeutta – eli tahtinopeutta. Roottorin akselin pyörimisnopeuden ja staattorikentän pyörimisnopeuden eroa kutsutaan jättämäksi. Ilman kuormaa tyhjäkäyvän ja nimellispisteeseen kuormitetun oikosulkukoneen jättämä ei ole sama, vaan se kasvaa kuormituksen mukaan.

Induktiokoneille tyypillinen häkkikäämitys on rakenteeltaan kestävä ja yksinkertainen lisäksi sen valmistaminen on edullista. Kiinteällä häkkikäämityksellä valmistetun koneen vääntömomentin säätäminen ei ole mahdollista ilman taajuusmuuttajaa. Roottorikäämityksestä on mahdollista valmistaa myös säädettävä, jolloin koneen vääntömomenttia voidaan tiettyjen rajojen sisällä säätää, mutta rakenne tulee monimutkaisemmaksi. Säädettävällä roottorikäämityksellä varustettua konetta kutsutaan liukurengaskoneeksi.

2.1.2 Tahtikoneen roottori

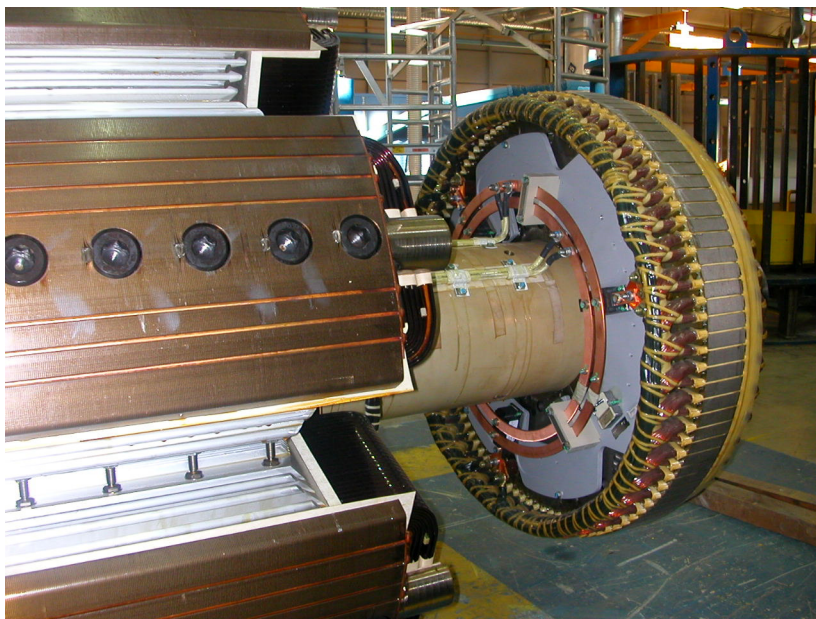
Tahtikoneissa roottorin magneettinavat magnetoidaan ulkoisella virralla tai kestopagneeteilla. Tällöin roottorin magneettinapojen magneettivuo ei riipu staattorin magneettikentän pyörimisnopeudesta vaan sitä voidaan mahdollisesti jopa säätää ja näin muuttaa koneen ominaisuuksia.

Koneen käydessä roottorilla olevat magneettinavat pyörivät samalla nopeudella kuin staattorin käämityksen muodostama, pyörivä magneettikenttä. Tällöin koneen sanotaan olevan tahdissa eli käyvän tahtinopeutta. Hallitsemattomissa tilanteissa pyörimisnopeuden ollessa jokin muu kuin tahtinopeus, sanotaan koneen joutuneen pois eli tippuneen tahdistä. Tällaisessa tilanteessa on kone kytkettävä nopeasti irti verkosta.

Magnetointivirran vienti pyörivän rajapinnan yli koneen magneettinavoille vaatii omat järjestelynsä. Tyypillisiä vaihtoehtoja virran syöttöön ovat niin sanotut harjaton ja harjallinen magnetointi.

Harjallisella magnetoinnilla tarkoitetaan roottorin magneettinapojen virran syöttämistä liukurenkaistolla ja niiden pintaa vasten laahaavilla hiiliharjoilla. Tällöin ulkoisesta tasavirtalähteestä syötetty virta kulkee suoraan napakäämissä ja magnetoi magneettinavat. Tällainen magnetointitapa on koneen säädettävyyttä ajatellen paras, koska virtaa voidaan mitata suoraan ja säätää nopeammin kuin harjattomassa rakenteessa.

Harjattomassa magnetoinnissa roottorin akselille on asennettu apu- eli magnetointikone. Magnetointikone toimii kuten pieni generaattori. Kone koostuu pyörivästä osasta eli roottorista ja paikallaan olevasta osasta eli staattorista. Tällaisen tahtikoneen sanotaan usein koostuvan kahdesta koneesta, pää- ja apukoneesta. Apukoneen staattoriin syötetään tasavirtaa ulkoisesta, säädettävästä tasavirtalähteestä. Pyöriessään magneettikentässä apukoneen roottorin käämitykseen indusoituu jännite, joka tasasuunnataan. Näin syntynyt tasavirta magnetoi pääkoneen magneettinavat. Myös harjattomassa magnetoinnissa voidaan magneettinapojen virtaa säätää, mutta säätöpiiri on tyypillisesti hitaampi reagoimaan muutoksiin kuin harjallisessa magnetoinnissa.



Kuva 2. Tahtikoneen apu- eli magnetointikone

Kuvassa 2 nähdään tahtikoneen roottori, oikealla herätinkone. Herätinkoneessa on myös nähtävissä diodisilta ja DC-kiskot.

Tasavirtamagnetoidulla roottorilla toteutettu tahtikone on mutkikkaampi ja kalliimpi valmistaa, mutta koneen säädettävyys on ylivoimainen. Kestomagneetein toteutetun koneen rakenne on yksinkertaisempi kuin tasavirralla magnetoidun, mutta kuten induktio-kone, on senkin säädettävyys monimutkaisempaa. Säädettävyydellä tässä tarkoitetaan koneen pätö- ja loistehon säätöä.

2.2 Staattori

Staattori koostuu kahdesta aktiivisesta komponentista: sähkövirtaa hyvin johtavasta materiaalista valmistetusta käämityksestä ja magneettikenttää hyvin johtavasta levypaketista. Edellä mainittujen osien lisäksi tarvitaan myös käämityksen eristeet. Tahtikoneen ja induktio-koneen erot rajoittuvat pelkästään roottorin osalle, joten staattorin rakennetta voidaan tarkastella yleisesti.

2.2.1 Staattorin levypaketti

Staattoripaketti koostuu ladotuista sähkölevyistä, pakettia puristavasta sormirenkaasta ja sidepalkeista. Rakenteesta riippuen koneen ympärillä voi lisäksi olla ilmanohjausvaippa.



Kuva 3. Ilmanohjausvaipalla varustettu staattorin levypaketti



Kuva 4. Lähikuva staattorin urista

Levypaketin toimiessa magneettipiirin osana aiheuttaa vaihtosähköverkon taajuus siinä myös magneettikentän vaihtelua. Tämä asettaa magneettipiirissä käytettävälle materiaalille ja rakenteelle tiettyjä rajoituksia. Muuttuva magneettikenttä saa metallikappaleissa aikaan pyörrevirtoja. Lisäksi magneetoitussa raudassa syntyy hystereesihäviöitä. Näiden häviöiden summaa kutsutaan yleisesti rautahäviöiksi. Oikeilla materiaalivalinnoilla ja rakennesuunnittelulla näihin häviöihin on mahdollista vaikuttaa. Lopullinen ratkaisu on kuitenkin valmistuskustannusten ja häviöiden kompromissi.

Levypaketti muodostaa myös tehokkaan siirtymisreitit lämmölle, näin staattorikäämyksessä syntyvä lämpö saadaan johdettua koneen läpi puhallettuun ilmaan ja sen avulla pois koneesta.

Koneen vääntömomentti ja kuormituksen aiheuttamat vaihtelut saattavat asettaa erityisvaatimuksia levypaketin mekaaniselle rakenteelle ja erityisesti sen kiinnitykselle koneen runkoon.

2.2.2 Staattorin käämitys

Käämitys koostuu yksittäisistä vyyhdeistä ja niitä yhdistävistä kytkentäosista eli kytkennästä. Staattorin käämitys valmistetaan hyvin sähköä johtavasta materiaalista, esimerkiksi kuparista. Käämitys voidaan valmistaa joko eristetyistä pyörö- tai muotolangasta.

Pyörö- ja muotolangan suurimpia eroja on niillä saavutettava uran täytekerroin. Täytekerroimella tyypillisesti kuvataan urassa olevan kuparin yhteenlasketun poikkipinta-alan suhdetta uran käytettävissä olevaan poikkipinta-alaan. Käytettävissä oleva pinta-ala tarkoittaa pinta-alaa, joka jää kun uran pinta-alasta vähennetään uraeristeen ja urakiilan vaatima ala.

Pyörölangalla täytekerroin on noin 60 %, kun se muotolangalla on noin 80 %. Täytekerroimen lisäksi muotolangalla käämyssä koneessa käämin jäähtyminen on tehokkaampaa, koska jokainen lanka on vähintään yhdeltä sivulta levypakettia vasten.

Erilaisia käämysrakenteita on olemassa useita. Käämitys voidaan valmistaa yhteen tai kahteen tasoon. Lisäksi käämit voidaan sijoitella limittäin tai keskitetysti.

3 ERISTEET

Eristeiksi kutsutaan materiaaleja, joiden sähkön johtavuus verrattuna johteisiin on huono. Myös eristemateriaalista valmistettuja käyttövalmiita levyjä, tankoja jne. kutsutaan eristeiksi. Eristys on sähköiset osat toisistaan erottava kokonaisuus. Eristyksen päätehtävä on sähköisten osien eristäminen, mutta yhdessä kyllästys lakan tai –hartsin kanssa lisää se myös merkittävästi käämyksen mekaanista lujuutta. [2, s. 256.]

Erilaisia eristeeksi sopivia materiaaleja on olemassa hyvin runsaasti. Kuitenkin pääosa pyörivissä sähkökoneissa käytävistä eristeistä kuuluu johonkin seuraavista neljästä pääryhmästä. Polyesterikalvo, aramid-kuidut, kiille ja epoksi- tai polyesterihartsit. [2, s. 257.]

Sähköisen lujuuden, lämmön ja mekaanisen rasituksen lisäksi eristemateriaaleilta vaaditaan suurjännitekoneissa myös osittaispurkausten kestävyys. Osittaispurkauksilla tarkoitetaan ilmapölyssä tapahtuvia pienenergisiä läpilyöntejä. Läpilyönti syntyy kahden eri potentiaalissa olevan elektrodin välille kun suurjännitteinen sähkökenttä ionisoi ympäröivän ilman, jolloin se muuttuu johtavaksi. Läpilyönnin aikana ilmapölyn jännite romahtaa nolleen ja jänniterasitus jää kokonaan eristeen varaan.

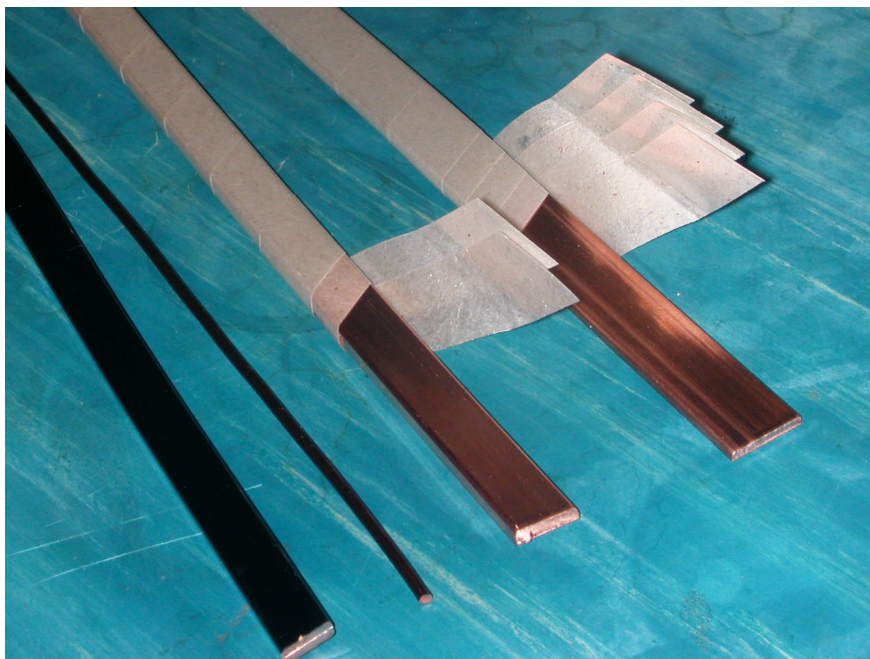
Oikealla tavalla ja oikeilla materiaaleilla valmistettu eristys kestää osittaispurkauksen eikä vaurioidu siitä. Läpilyönti kuitenkin aiheuttaa lämpenemistä, jolla voi olla eristettä vanhentava vaikutus. Lisäksi purkaukskohdassa eristemateriaalia termisen ja kemiallisen vaikutuksen seurauksena ”kuluu”. Osittaispurkauksia esiintyy erityisesti suurjännitekoneissa. Tämän vuoksi niissä käytetään lähes pelkästään kiillepohjaisia eristeaineita, jotka kestävät hyvin osittaispurkauksia.

Eristeet voidaan jakaa kahteen luokkaan: pää- ja johdineristeisiin.

3.1 Johdineristeet

Johdineristeet eristävät käämin kierrokset toisistaan eikä niille tyypillisesti aseteta läheskään niin suuria jännitelujuusvaatimuksia kuin pääeristykselle. Sähköisen lujuuden lisäksi johdineristeeltä vaaditaan hyvää lämmönkestoa, koska se on lähinnä kuumaa johdinta. Myös johdineristeen vaikutus täytekerrotimeen on merkittävä. [2, s. 256 – 258.]

Tyypillisin johdineriste pienjännitteisissä sähkökoneissa on amidi-imidi-päällystetty polyesteri-imidimuovi eli niin sanottu emali, joka on käytössä pyörölangoissa lähes poikkeuksetta. Muotolangoissa tyypillinen johdineriste on valmistettu levymäisestä eristeestä, joka on leikattu kapeaksi nauhaksi ja kiedottu muotolankajohtimen ympärille. Johdineristeen materiaali ja paksuus riippuu johtimen muun muassa eristykselle halutusta jännitelujuudesta.



Kuva 5. Kuparijohtimia

Kuvassa 5 on erilaisia kuparijohtimia. Vasemmalta alkaen emalieristeinen muotokuparijohdin, emalieristeinen pyörölanka sekä kaksi erilaista kiille-eristeistä muotokuparijohdinta.

3.2 Pääeristeet

Pääeristeeksi luokiteltavat eristeet erottavat koneen eri potentiaalissa olevat osat toisistaan. Tällaisia eristykksiä ovat esimerkiksi: uraeristeet, vaiheväl-lieristeet, kytkennän johtimien ja liitosten eristeet sekä roottorin magneettinapojen napaeristeet.

Tyypillisesti pääeristyksessä osana toimivat myös käämityksen ilmavälit. Ilmavälit heikentävät myös kosteuden ja lian myötä syntyviä pintavirtoja sekä tehostavat käämityksen jäähdytystä. Kasvatettaessa koneen käyttöjännitettä on eristystä parannettava eli tyypillisesti lisättävä eristekerroksia tai kasvatettava ilmavälejä. Paksumpi eristys kuitenkin vaikeuttaa myös lämmön siirtymistä ja näin heikentää koneen jäähdytystä. Suuremmat ilmavälit taas voivat vaativat enemmän tilaa ja johdinkuparin menekki voi olla suurempi.

Sähköisen lujuuden lisäksi eristeiltä vaaditaan myös mekaanista kestävyyttä. Mekaaniselle rasitukselle joutuvat pääeristuksen uloimmat kerrokset erityisesti uran suun kohdalta kääminnän aikana.

3.3 Kyllästys

Oleellisena osana eristyksessä toimii kyllästys lakka tai – harts. Sen tehtävänä on tunkeutua eristyksessä oleviin rakoihin ja huokosiin sekä täyttää ne. Lisäksi kyllästysaine kovettuessaan lisää käämityksen mekaanista lujuutta ja parantaa lämmönjohtuvuutta. Se myös muodostaa tiiviin kalvon, joka estää kosteutta ja likaa tunkeutumasta eristyksen sisälle. [2, s.259.]

Eistemateriaalien, kyllästysaineiden ja -menetelmien valinta on kokonaisuus ja vaatii vuosien pitkäjänteistä kehitystyötä. Lopputulos on materiaalikustannusten, laitteiden ja prosessiajan kompromissi joka vaikuttaa erityisesti eristyksen käyttöikään, lämpötilaluokitukseen ja mekaaniseen lujuuteen.

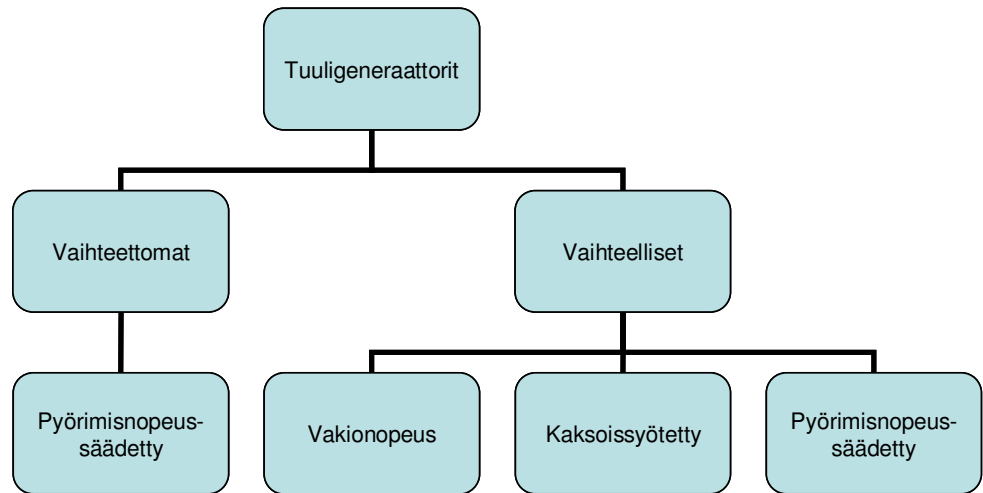
ABB:n Pitäjänmäen konetehtaalla on käytössä VPI (*vacuum pressure impregnation*) kyllästysmenetelmä. Tällöin kyllästettävä kappale suljetaan ilmatiiviiseen säiliöön josta ilma pumpataan pois. Ilman poistamisen jälkeen säiliöön lasketaan kyllästysainetta niin, että kyllästettävä kappale peittyy kokonaan. Lopuksi säiliöön jäävä ilmatila paineistetaan ylipaineeseen. Ylipaine nopeuttaa kyllästysainetta tunkeutumaan nopeasti kyllästettävään kappaleen huokosiin eristeisiin.

4 TUULIGENERAATTORIT

Energian kulutus kasvaa maailmassa koko ajan. Fossiilisten polttoaineiden väheneminen, huoli ympäristön tilasta ja halu löytää kestäviä energiantuotantovaihtoehtoja lienevät tärkeimpiä syitä tuulivoiman kehittämiseksi. Vaikka tuulienergialla on omat ongelmat on se yksi lupaavin uusiutuvista energiantuotantomuodoista.

Suurimmat ongelmat tuulienergian käytössä ovat sen sijoituksessa. Paikoissa, joissa tuulee paljon ei yleensä ole kulutusta. Tuotaessa tuulivoimalaitokset lähelle kulutusta koetaan turbiinin siivistä syntyvä ääni häiritsevänä meluna. Lisäksi sen visuaalinen vaikutus ympäristöön on ilmeinen. Myös sähköverkko asettaa omat rajoitteet tuulienergialle. Loistehotasapainon on pysyttävä sopivana, ettei verkon stabiilius vaarannu. Tämä voi vaikuttaa muun muassa voimalan generaattorivalintaan. Verkossa oleva säätötehon kapasiteetti on myös oltava riittävä, jotta vaihtelut tuulivoimalaitosten energiantuotannossa voidaan tasata.

Ilman tukea tuulienergia ei tällä hetkellä pärjää kilpailussa perinteisille energiantuotantomuodoille. Kuluttajien halu suosia ympäristöystävällistä energiantuotantoa on kuitenkin luonut kasvavat markkinat tuulienergialle.



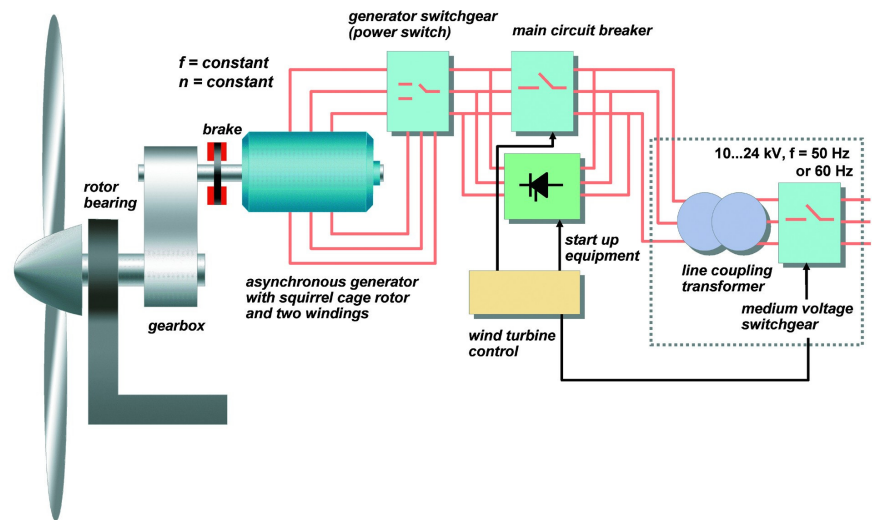
Kuva 6. Erilaisia tuulivoimaloissa käytettäviä generaattoreita

Eri tuulivoimaloiden valmistajat käyttävät erilaisia generaattorirakenteita eikä joukosta voida suoraan nimetä parasta rakennetta. Lopputulos on kompromissi käyttönopeusalueen, hyötysuhteen, huolto- ja valmistuskustannusten välillä.

4.1 Vakionopeuskäyttö

Vakionopeuskäytöllä tarkoitetaan tässä rakennetta jossa generaattori on kytketty suoraan verkkoon. Tällöin generaattorina toimii esimerkiksi oikosulkuroottorilla varustettu epätahtikone jossa voi olla käämityksiä useammalle eri napaluvulle. Rakenteen etuja on käytetyn generaattorin yksinkertainen ja vakioitu rakenne. Ilman taajuusmuuttajaa myös hankintahinta on halvempi ja sähköiset häviöt ovat pienet. Vakionopeuskäyttö edellyttää kuitenkin vaihteiston, joka vaatii huoltoa ja synnyttää mekaanisia häviöitä.

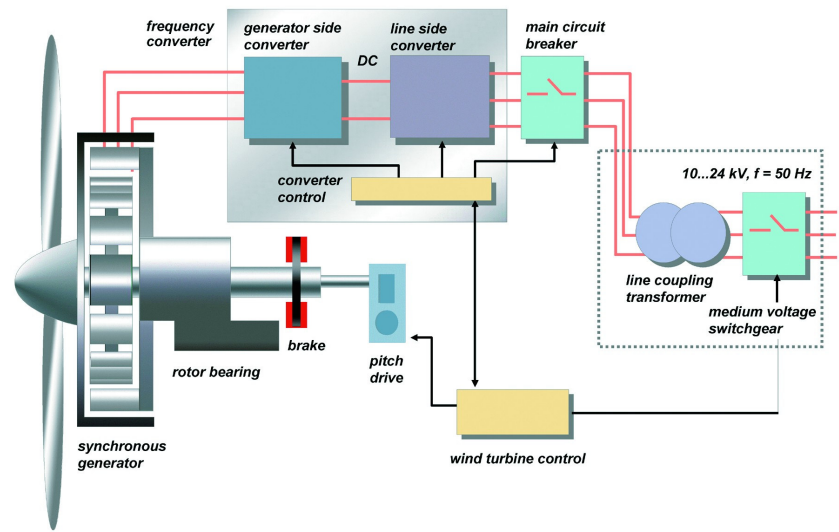
Vakionopeusrakenteen vuoksi induktiogeneraattori voi tuottaa sähköä verkkoon vasta pyöriessään käämityksen nimellis- eli tahtinopeutta suuremmilla pyörimisnopeuksilla.



Kuva 7. Vakionopeuskäyttö (kuva: ABB Oy)

4.2 Pyörimisnopeussäädetty käyttö

Pyörimisnopeussäädetyllä käytöllä tarkoitetaan tässä generaattorin kytke- mistä verkkoon taajuusmuuttajan välityksellä. Tällöin generaattorin pyörimis- nopeuden vaihtelusta johtuva tehovaihtelu ei vaikuta verkkoon syötettävään sähkön laatuun. Lisäksi taajuusmuuttajalla on mahdollista säätää verkkoon syötettävää loistehoa. Taajuusmuuttajan tarvitsema huolto on vähäinen, mutta tasa- ja vaihtosuuntauksessa syntyy häviöitä. Lisäksi taajuusmuuttaja on mitoitettava generaattorin nimellisteholle, tällöin sen hankintahinta voi olla suuri.



Kuva 8. Pyörimisnopeussäädetty käyttö (kuva: ABB Oy)

Pyörimisnopeussäädetyissä käytöissä generaattorina käytetään tyypillisesti hitaita tahtikoneita jotka kytketään tuuliturbiiniin suoraan ilman vaihteistoa. Tällöin vaihteiston häviöt ja sen tarvitsema huolto jää kokonaan pois käyttökustannuksista.

Työssä valmistettu prototyyppituuligeneraattori oli juuri tällaista tyyppiä.

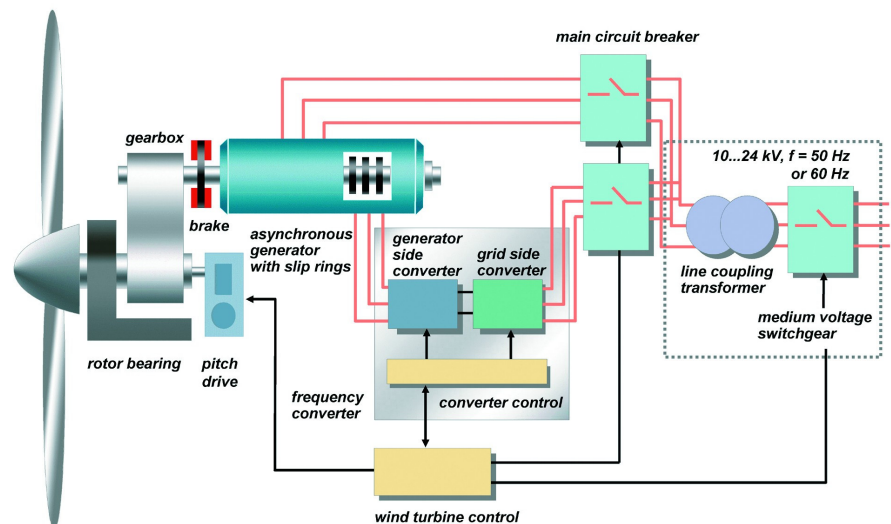
Nykyään myös vaihteelliset pyörimisnopeussäädetyt käytöt ovat yleistymässä.

4.3 Kaksoissyötetty käyttö

Kaksoissyötetyllä käytöllä tarkoitetaan tässä vakionopeuskäytöstä laajennettua rakennetta. Tällöin voidaan toimia epätahtigeneraattorin sekä yli- että alisynkronisilla alueilla. Suuremmilla pyörimisnopeuksilla osa energiasta otetaan pyörivältä roottorilta ja syötetään taajuusmuuttajalla verkkoon. Vastavasti pienemmillä nopeuksilla generaattorin tuottamasta tehosta osa syötetään takaisin roottorille.

Kaksoissyötetyssä käytössä olevan generaattorin rakenne eroaa vakionopeuskäytön generaattorista pääasiassa roottorin osalta. Roottorissa on oikosulkutankojen ja -renkaiden sijaan kolmivaiheinen käämitys, joka on kytketty liukurenkaiston kautta taajuusmuuttajalle. Staattorin käämitys on tyypillisesti normaali, eikä sisällä useammalle napaluvulle käämittyjä käämityksiä.

Kaksoissyötetyssä käytössä oleva taajuusmuuttaja voidaan mitoittaa merkittävästi pienemmälle teholle ja näin sen hankintahinta on edullinen. Lisäksi voimalan toiminta-alue laajenee käsittämään sekä yli-, että alisynkroninopeuksia.



Kuva 9. Kaksoissyötetty käyttö (kuva: ABB Oy)

5 KESTOMAGNEETTIKONEET

Kestomagneetikoneet ovat yleistyneet magneettimateriaalien kehittymisen myötä. Ne soveltuvat hyvin hitaisiin, suuren napaluvun koneisiin.

Kestomagneetikoneilla voidaan saavuttaa korkeampi hyötysuhde kuin sähkömagnetoidulla, koska napojen magnetointihäviöt tai oikosulkuroottorin tehohäviöt jäävät pois. Pienemmät häviöt saavat myös koneen käymään viileämpänä.

Magneettimateriaalit demagnetoituvat, mikäli niille ominainen rajalämpö ylitetään. Demagnetoitumislämpötilaan vaikuttaa staattorikäämityksessä muodostuva vastakenttä. Nimellispisteeseen kuormitettu kone voi häiriötilanteessa nopeasti saavuttaa demagnetoitumispisteen. Tämä vaatii ohjausjärjestelmältä kykyä havahtua riittävän ajoissa ja kytkeä kone irti verkosta ennen kuin demagnetoitumista pääsee tapahtumaan.

6 SÄHKÖKONEEN KÄÄMITYS

Sähkökoneen suunnittelussa käämitysrakenteen valinnalla vaikutetaan koneen ominaisuuksiin. Sähkökoneen käämitys valitaan siten että valmis kone täyttäisi mahdollisimman hyvin sille asetetut vaatimukset. Kokonaisuus on aina monen asian kompromissi, eikä kaikkia ominaisuuksiin vaikuttavia seikkoja ole tarkoituksenmukaista käydä tässä läpi. Kuitenkin tiettyjen asioiden kuvaaminen on tarpeellista jotta lukijalle tulisi kuva kokonaisuudesta. Koneen napapariluku, vakoluku ja staattorin uraluku voidaan mainita tärkeimpinä.

Asiakaslähtöisesti pyritään löytämään sopiva kokonaisuus, joka täyttää asiakkaan vaatimukset ja on silti mahdollista valmistaa kustannustehokkaasti. Kustannustehokkuuden varjolla ei koneiden laatu kuitenkaan saa heikentyä. Laatu on seikka mistä asiakas ei tyypillisesti ole valmis tinkimään. Sähkökoneen pitkä käyttöikä asettaa uusien menetelmien ja materiaalien käyttöön otolle isoja haasteita.

Tässä keskitytään tarkastelemaan sähkökoneen käämitystä vain staattorin osalta.

6.1 Pyörimisnopeus ja vääntömomentti

Käyttökohde tyypillisesti määrää halutun pyörimisnopeuden ja vääntömomentin, tällöin määräytyy myös koneen napapariluku. Koneen napapariluvun p ja syöttöverkon taajuus f määräävät koneen tahtinopeuden n_s .

$$n_s [rpm] = 60 * \frac{f}{p}$$

Kuormamomentti määrää koneelta tarvittavan vääntömomentin. Riippuen kuorman laadusta voi nimellismomentin lisäksi olla syytä varmistaa muun muassa maksimimomentin ja käynnistysmomentin riittävyys.

Vääntömomentin ja pyörimisnopeuden perusteella myös koneen runkokoko määräytyy melko tarkkaan.

6.2 Vakoluku

Staattoripaketin urien lukumäärän koneen napaa ja vaihetta kohti kuvataan vakoluvulla q , vakoluku q määritellään seuraavasti:

$$q = \frac{Q}{2pm}$$

Yhtälössä q on vakoluku, Q on uraluku, p on napapariluku ja m on vaiheiden lukumäärä. Kaksikerroslimikäämityksessä yhdessä urassa on kaksi vyyhden sivua, jolloin vakoluku ilmaisee myös vyyhtien lukumäärä napaa ja vaihetta kohti.

Vakoluvun valintaan vaikuttaa useat seikat. Verrattaessa esimerkiksi vakolukuja kaksi ja kolme:

Vakoluvulla kaksi vyyhtiryhmässä on sarjassa kaksi vyyhteä kun vakoluvulla kolme niitä on yksi enemmän. Mikäli jännite ja magneettivuo pidetään vakiona, vakoluvulla kaksi koneen vyyhdissä on oltava enemmän kierroksia.

Mikäli uran mitat pidetään samana, vyyhdin kierrosmäärän kasvattaminen pakottaa siirtymään ohuempaan johdinkupariin. Toisaalta suuremmalla vakoluvulla ja samalla koneen runkokoolla urien lukumäärän kasvattaminen lisää urien yhteenlaskettua pinta-alaa, joka parantaa lämmön siirtymistä vyyhdeistä levypakettiin. Suuremmalla uraluvulla pienenee rautapiirin pinta-ala jota pitkin magneettivuo kulkee. Vuontiheys on tyypillisesti suure joka pyritään pitämään niin suurena, kuin magneettipiirissä käytettyjen materiaalien ominaisuudet sallivat. Pinta-alan pienentyessä kokonaisvuo pienenee, mikäli vuontiheys pidetään vakiona.

Pienemmällä vakoluvulla urien lukumäärä vähenee ja on mahdollista, että koneen pyöriessä hammasmomentin aiheuttaman värähtelyn taajuus pienenee ja intensiteetti kasvaa.

Suurempi intensiteetti lisää myös resonanssien syntymisriskiä. Värähtely voidaan mahdollisesti aistia voimistuneena koneen käyntiäänenä, rungon ja kiinnitysalustan mekaanisena tärinänä sekä akselilla momentin särönä. Akselilla vaikuttava momentin särö voi herättää kuormassa niin voimakkaan resonanssin, että se näkyy rakenteiden väsymisenä.

Myös kytkennän rinnakkaisten haarojen määrällä on vaikutusta vakoluvun valintaan. Rinnakkaiset haarat vaikuttavat myös vyyhtien kierrosmäärään. Suuremmalla kierrosmäärällä yhden kierroksen vaikutus on suhteellisesti vähäisempi ja sitä kautta voidaan saada parempi vuon sovitus. Vuon sovituksella tarkoitetaan käämiin muodostuvan magneettivuon valintaa siten, ettei se ylitä materiaalien määräämää suurinta sallittua vuontiheyttä.

Kokonaisuus on monen ominaisuuden summa, mitään selvää ohjetta ei suunnittelulle voida antaa.

6.3 Käämikerroin

Mikäli valmistetaan käämitys jossa on yksi lävistäjävyyhti napaa ja vaihetta kohti ($q=1$), tällöin navan magneettikenttä leikkaa yhdellä kertaa koko vyyhden. Tällaiseen käämitykseen indusoituva jännite määräytyy suoraan vyyhden kierrosmäärän ja leikkaavan magneettivuon sekä sen muutosnopeuden perusteella. Edellä mainitulla käämityksellä vaiheen vyyhtiin indusoituva jännite on suurin mahdollinen. Tällöin koneen käämikerroin sanotaan olevan 1.

Tällaisen koneen käämitykseen indusoituva sähkömotorisen voiman (e) huippuarvo voidaan laskea Faradayn induktiolailla seuraavasti.

$$e = -N * \frac{d\Phi}{dt}$$

N on vyyhden kierrosluku ja Φ käämin leikkaava magneettivuo.

Käämikerroin (ξ) kuvaa valitun käämityksen ja edellä mainitun lävistäjäkäämityn koneen välistä jännite-eroa. Käämityskerroin on siis suhdeluku ja se voi suurimmillaan saada arvon 1.

Sähkökoneen sähkömagneettinen vääntömomentti riippuu koneen käämituskertoimesta, joten kokonaiskäämityskerroin tulisi olla mahdollisimman suuri.

Koneen kokonaiskäämityskerroin muodostuu seuraavalla tavalla:

$$\xi = \xi_q \cdot \xi_v \cdot \xi_j$$

ξ on kokonaiskäämityskerroin, ξ_q vyöhykekerroin, ξ_v vakovaihtelun jännekerroin ja ξ_j jännekerroin. Osa kertoimista voi käämityksen rakenteen vuoksi olla 1.

Käämikerroin voidaan määritellä perusaallon lisäksi myös sen kerrannaisille eli yliaalloille. Tällöin suunnittelun yksi lähtökohta voi myös olla sähköverkolle ja koneen ominaisuuksille haitallisten yliaaltojen pienentäminen.

Riippuen käämityksen rakenteesta voidaan käämikertoimet laskea matemaattisesti. Tällöin on kuitenkin huomioitava, että erilaisille käämityksille on käytettävä erilaisia yhtälöitä. Käämikertoimista on laadittu erilaisia taulukoita, ohessa esimerkkinä jännekertoimen taulukko eräälle käämitykselle.

Taulukko 1. Erään käämityksen jännekertoimia [3, Taulukko 2.4, s. 40]

Q_s		Poles										
		4	6	8	10	12	14	16	20	22	24	26
6	ξ_1	0.866	**	0.866	0.5	**	0.5	0.866	0.866	0.5	**	0.5
	q	0.5		0.25	0.2		0.143	0.125	0.1	0.091		0.077
9	ξ_1		0.866	0.945*	0.945*	0.866	0.617	0.328	0.328	0.617	0.866	0.945
	q		0.5	0.375	0.3	0.25	0.214	0.188	0.15	0.136	0.125	0.115
12	ξ_1			0.866	0.933	**	0.933	0.866	0.5	0.25	**	0.25
	q			0.5	0.4		0.286	0.25	0.2	0.182		0.154
15	ξ_1				0.866	**	0.951*	0.951*	0.866	0.711	**	0.39
	q				0.5		0.357	0.313	0.25	0.227		0.192
18	ξ_1					0.866	0.902	0.945	0.945	0.902	0.866	0.74
	q					0.5	0.429	0.375	0.3	0.273	0.25	0.231
21	ξ_1						0.866	0.89	0.953*	0.953*	**	0.89
	q						0.5	0.438	0.35	0.318		0.269
24	ξ_1							0.866	0.933	0.949	**	0.949
	q							0.5	0.4	0.364		0.308

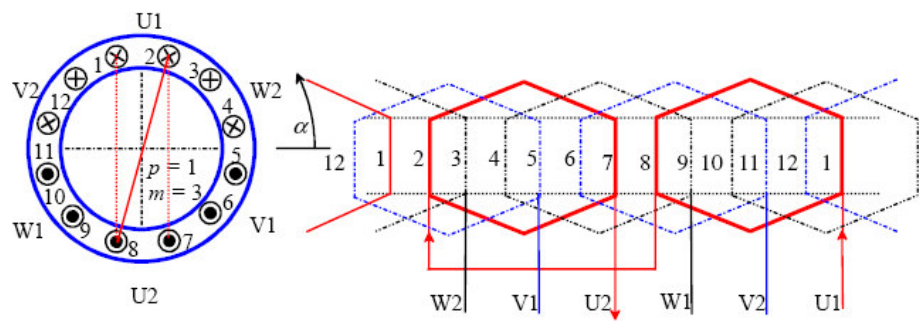
* ei suositeltu tasapainottoman magneettisen vedon vuoksi, ** ei suositeltu, koska vakoluvun nimittäjä on vaiheluvun kerrannainen

Käämityksen jännekerroin vaihtelee erilaisilla napa- ja uraluvuilla (taulukko 2). Taulukko on laadittu kaksikerroksiselle keskitetylle murtovakokäämitykselle, kun vakoluku on pienempi, tai yhtä suuri kuin 0,5.

Haluttaessa kasvattaa koneen tehoa joudutaan herkästi tilanteeseen, jossa tehon lisäys virtaa kasvattamalla ei ole järkevää. Suurempi virta edellyttäisi käämityksessä käytettävän johdinmateriaalin poikkipinta-alan suurentamista. Vaihtoehto virran kasvattamiselle on koneen jännitteen nostaminen. Suurempi jännite vaatii paremman eristyksen, mutta on silti edullisempi vaihtoehto.

Jännitteen kasvattaminen edellyttäisi joko käämin kierrosmäärän, magneettivuon tai magneettivuon leikkausnopeuden suurentamista. Kasvatettaessa käämin kierrosmäärää joudutaan johdinkuparin poikkipinta-alaa pienentämään mikäli uran mitat halutaan säilyttää samana. Suurempi magneettivuota taas vaatisi magneettipiirin materiaaleilta parempia ominaisuuksia. Leikkausnopeuden kasvattaminen edellyttäisi joko suurempaa pyörimisnopeutta tai napapariluvun kasvattamista. Kummallakin on omat rajoituksensa.

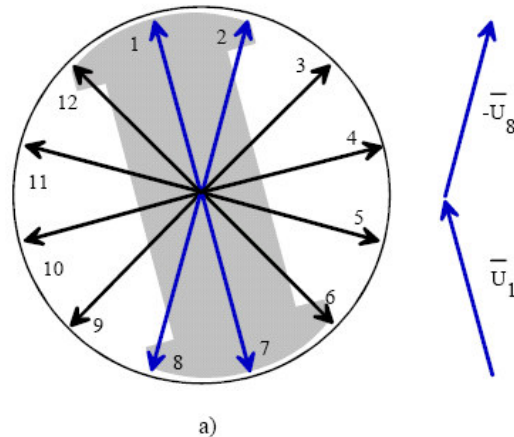
Käytännöllisempi tapa kasvattaa koneen jännitettä on kytkeä useita vyyhtejä sarjaan vyyhtiryhmäksi. Näin kytketyn vyyhtiryhmän kokonaisjännite muodostuu suuremmaksi kuin yksittäisen vyyhden. Vyyhdet on kuitenkin aseteltava staattoripakettiin hieman eri kohtiin, jotta käämitys olisi mahdollista valmistaa. Riippuen valitusta käämitysrakenteesta voi leikkaava magneettikenttä olla vyyhtiryhmän eri vyyhdeissä hieman erivaiheinen, jolloin summautuva kokonaisjännite poikkeaa aritmeettisesta summasta.



Kuva 10. Kolmivaihekäämitys, $Q=12$, $q=2$ ja $p=1$. [2, Kuva2.8, s. 2.9.]

Kuvasta 10 voidaan nähdä, kuinka vyyhtiryhmät on kytketty sarjaan. Käämityksen kulku on seuraavanlainen: $U_1 \rightarrow \text{ura1} \rightarrow \text{ura8} \rightarrow \text{ura2} \rightarrow \text{ura7} \rightarrow U_2$. Vaiheen jännitteen lauseke tässä tapauksessa on seuraavanlainen:

$$\overline{U_U} = \overline{U_1} - \overline{U_8} + \overline{U_2} - \overline{U_7}$$



Kuva 11. käämityksen uratähti ja jännitteen osavektorit [2, Kuva 2.10, s. 2.11]

Kuvassa 11 vasemmalla nähdään kuvan 10 käämityksen uratähti. Kuvassa oikealla on esitetty urissa 1 ja 8 olevan vyyhden jännitteen muodostuminen osavektoreista.

Uratähden avulla voidaan laskea koneen jännite laskemalla kokonaisjännite osavektoreista. Uratähti on kaikissa tilanteissa toimiva menetelmä erilaisten käämityksien käämikertoimen ratkaisemiseksi.

6.4 Jänteistys

Mikäli käämityksessä yhden vyyhdin sivut ovat 180 sähköasteen päässä toisistaan, puhutaan halkaisija- eli lävistäjäkäämityksestä. Näin ei kuitenkaan välttämättä tarvitse olla, vaan vyyhdin sivut voidaan asettaa toisiinsa nähden johonkin muuhunkin kulmaan. Tällöin vyyhdin sanotaan olevan jänteistetty.

Oikein tehtynä saadaan jänteistetyllä käämityksellä ilmeväliin sinimuotoisempi vuon tiheyskäyrä kuin halkaisijakäämityksellä. Avonapatahtigeneraattorissa, joissa vuon tiheyskäyrän määräytyy napakengän muodolla, saadaan jänteistetyllä käämityksellä sinimuotoisempi napajännite kuin halkaisijakäämityksellä.

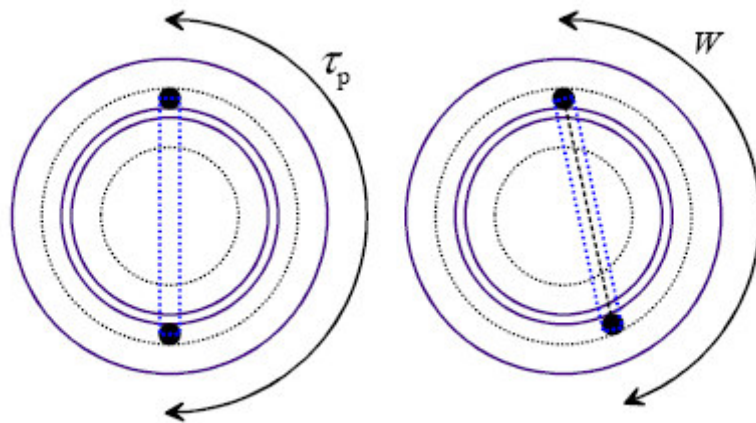
Valittaessa jänteistys sopivasti on mahdollista vaikuttaa myös koneessa syntyviin yliaaltoihin. Koneeseen on mahdollista valita jänteistys niin, että haitallinen yliaalto eliminoiduu. Käytettäessä koneessa kahta eri jänteistystä voidaan esimerkiksi eliminoida haitalliset viides ja seitsemäs yliaalto.

Jänteistetyssä käämityksessä pienenee vyyhden lävistävä vuo ja sen seurauksena myös jännite. Jänteistyksestä johtuvaa jännitteen pientymistä kuvataan jännekertoimella ξ_j .

Tyypillisimpiä jänteistystapoja ovat: askellyhennys, vakovaihtelu ja vakosekoitus [2, s. 2.14].

6.4.1 Askellyhennys

Askellyhennys on jänteistyksen yksinkertaisin muoto. Askellyhennyksellä tarkoitetaan käämistä jossa vyyhdin sivut on sijoitettu siten, että vyyhden sivut eivät ole 180 sähköasteen eli napajaon päässä toisistaan.



Kuva 12. Lävistäjäkäämin ja jännekäämin ero, kuvassa W on vyyhden leveys ja τ_p napajako [2, Kuva 2.13, s. 2.14]

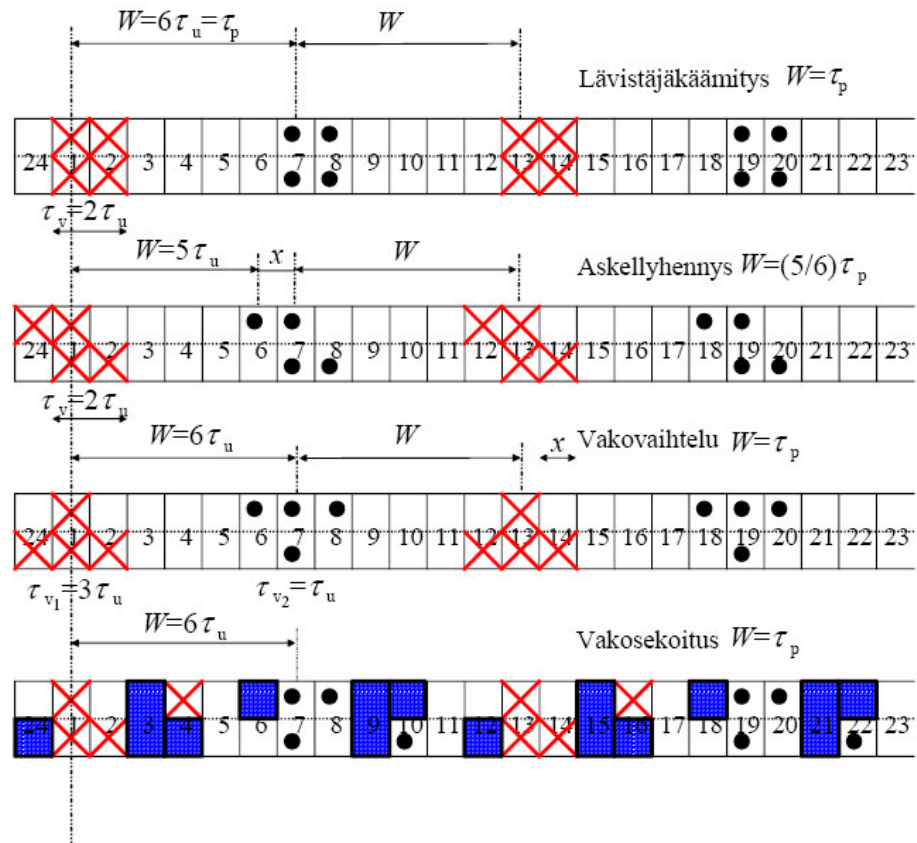
Sähköisesti ei ole merkitystä onko askelta pidennetty vai lyhennetty. Eräs askellyhennyksen erikoisempi muoto syntyy kun askelta pidennetään. Tämä voi olla tarpeellista tyypillisesti siksi, että suuremmalla vyyhtiaskeleella käämintä helpottuu.

6.4.2 Vakovaihtelu

Kaksikerroskäämistä käytettäessä voidaan jänteistys järjestää myös vaihtelemalla vyyhtien pinta- ja pohjasivuja keskenään. Tällöin vyyhtiryhmän sivut ovat siten epäsymmetrisesti, että toisella reunalla on lukumääräisesti useampi vyyhden pintasivu ja toisella vastaavasti pohjasivu. Tällöin vyyhden sivut ovat napajaon eli 180 sähköasteen päässä toisistaan, mutta käämitys on näennäisesti jänteistetty. Vakovaihtelusta syntyvä näennäinen jänteistys vaikuttaa vyyhtiryhmän jännitteeseen ja siten myös käämikertoimeen.

6.4.3 Vakosekoitus

Vakosekoituksessa yksi tai useampi vyyhtiryhmän vyyhdeistä on sijoitettu eri vaiheen vyyhtiryhmän "sekaan". Erityistä yleissääntöä vakosekoituksesta ei ole olemassa, vaan käämitykseltä vaaditut ominaisuudet määräävät ratkaisun. [2, s. 2.15.]



Kuva 13. Kaksikerroslimikäämityksen yleisimpiä jänteistystapoja [2, Kuva 2.14, s. 2.15]

Kuvassa 13 on esitetty yleisimpiä jänteistysmenetelmiä. Kuvassa τ_v on vyöhyke, τ_u on urajako, W on vyyhdenleveys, x on vyyhdenkavennus. Vyyhden toinen sivu on kuvattu pallolla ja toinen ristillä. Kuvan alaosassa vieraan vaiheen sivuja on kuvattu sinisillä ruuduilla.

6.5 Vyöhykkerroin

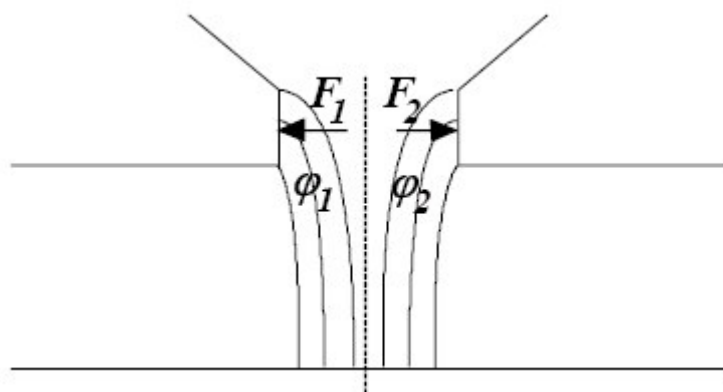
Vyöhykejako määräytyy, kun staattorin kehä jaetaan ensin tasan kaikille navoille. Näin saatu napajako τ_p jaetaan vaiheiden lukumäärällä, tällöin saadaan vyöhykejako τ_v . Vyöhykkeeseen kuuluvien urien lukumäärä on staattorin vakoluku q .

Koneen käämityksen vyöhykejako vaikuttaa vyyhtiryhmän sisällä osajännitteiden vaihekulmaan toisiinsa nähden. Tämän vuoksi käämityskertoimessa vyöhykejako huomioidaan vyöhykekertoimella ξ_q .

6.6 Hammasmomentti - *cogging torque*

Erityisesti kestopagneettikoneen rakenteessa on huomiotava, että staattorin uraluvun ollessa sama kuin roottorin napaluku tai sen kerrannainen, magneettisen vedon aiheuttamaa lisämomentti voi olla haitallisen suuri.

Tätä lisämomenttia voidaan kutsua englanninkielisen termin mukaan hammasmomentiksi (*cogging torque*). Ilmiö johtuu roottorin magneettinapojen vuon kohtaamasta magneettiirin reluktanssin vaihtelusta eri kohdissa staattoripakettia. Magneettiirin reluktanssi vaihtelee, kun vuo staattorin hampaan kohdalla joutuu läpäisemään vain suhteellisen lyhyen ilmavälin, mutta uran kohdalle kääntyessään huomattavasti pidemmän matkan. Ilmiöön vaikuttaa vähäisesti myös rautapiirin kyllästymisen. [4, s. 45.]



Kuva 14. Vuoviivojen kulku uran kohdalla [4, kuva 2.9, s. 45]

Vuot Φ_1 ja Φ_2 synnyttävät voimat F_1 ja F_2 (kuva 14). Niiden vaihtelu saa aikaan tangentiaalisen voiman joka vaihtelee roottorin pyöriessä. Mikäli koneen eri napojen voimavaikutukset eivät kokonaan kumoa toisiaan näkyy voimien resultantti koneen akselilla vääntömomentin värähtelynä, eli momenttisärönä (*torque ripple*). Hammasmomentista aiheutuu momenttisärön lisäksi myös muita värähtelyjä, jotka saattavat ilmentyä esimerkiksi koneen suurempana käyntiääninä

Ilmiö on puhtaimmillaan tyhjäkäyvällä sähkökoneella, mutta sitä esiintyy muuttuneena myös kuormitetussa koneessa.

Hammasmomenttia esiintyy kaikissa pyörivissä sähkökoneissa, koska käytännössä käämitys vaatii staattoriin jonkunlaiset urat. Roottorin magneettinapojen tai oikosulkutankojen urien vuoksi magneettipiirin epäjatkuvuuskohtia on myös roottorissa.

On olemassa erialisia rakenteita, joilla hammasmomenttia voidaan pienentää, esimerkiksi roottorin magneettinavan napakengän muotoilulla ja vinosti staattorikenttää leikkaavilla oikosulkutangoilla.

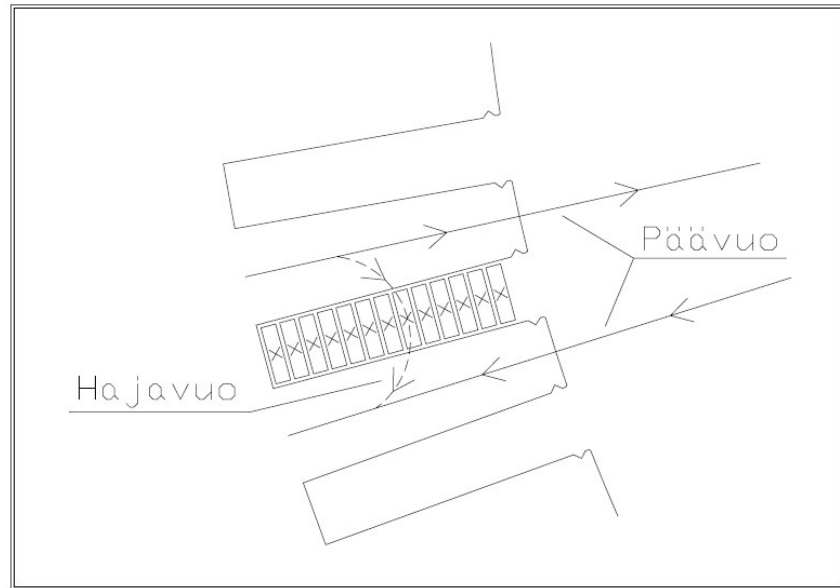
6.7 Virranaho

Magneettikentän vaikuttaessa virrallisen johtimen läpi se pakottaa varauksenkuljettajina toimivat elektronit johtimen reunamille. Magneettikentän ja elektronien kulkusuunta määrää mille reunalle varauksenkuljettajat siirtyvät. Tämän ilmiön havaitsi ensimmäisenä Edwin Herbert Hall vuonna 1879 ja ilmiö on nimetty hänen mukaansa Hall-ilmiöksi.

Magneettikentän pakottaessa varauksenkuljettajat käyttämään vain osaa johtimesta ne joutuvat kulkemaan pienempää poikkipinta-alaa pitkin. Ilmiö vastaa täysin tilannetta jossa käytettyä johdinta pienennettäisiin. Tällöin johtimen resistanssi näennäisesti kasvaa ja samalla lisääntyvät myös johtimessa syntyvät häviöt.

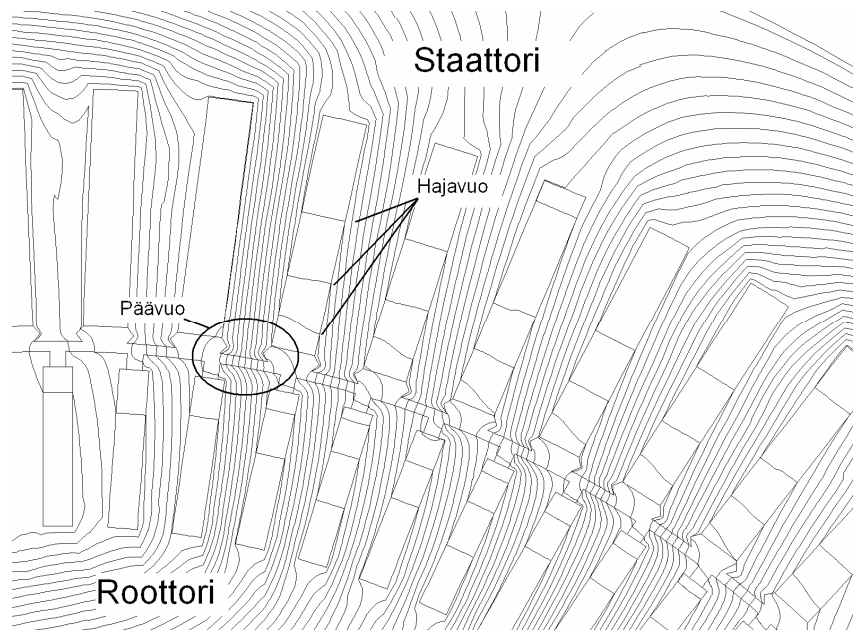
Magneettikentän aiheuttamaa resistanssin kasvua kutsutaan virranahoilmiöksi. Hyvällä suunnittelulla voidaan ilmiön vaikutusta pienentää. Erityisesti valittaessa staattorikäämityksen johdinta on syytä huomioida, ettei johtimen yhtenäinen pinta-ala hajavuota vastaan kohtisuorassa olevan tason suunnassa tule liian suureksi.

Virranahto syntyy, kun hajavuo lävistää johtimen ja pakottaa varauksenkuljettajat johtimen pinnalle.



Kuva 15. Staattoripaketin leikkaus tarkesteltuna akselin suunnasta

Kuvassa 15 voidaan karkeasti nähdä, kuinka hajavuo lävistää staattorin urassa olevia johtimia.



Kuva 16. Vuoviivojen kulku rautapiirissä

Kuvassa 16 on esitetty vuoviivojen kulku rautapiirissä. Kuva on tehty magneettikenttien laskentaan suunnitelluilla fem-laskentaohjelmalla, jolla voidaan mallintaa magneettivuon kulkua koneen sisällä.

Kuvasta 16 nähdään, kuinka hajavuo lävistää staattorin uran ja samalla urassa olevan käämin johtimet, selvyyden vuoksi johtimia ei kuitenkaan ole piirretty kuvaan. Myös roottorissa kulkee hajavuota.

6.8 Murtovakokäämitys

Murtovakokäämitykseksi kutsutaan käämistä, jossa staattorin tai roottorin uraluku jaettuna napaa ja vaihetta kohti on murtoluku. Tällöin siis q on murtoluku.

Murtovakokäämityksen etuja kokovakokäämityksiin ovat muun muassa suuri uraluvun valinnanvapaus, magneettivuon parempi sovitin ja saman uraluvun soveltaminen usealle napaluvulle. [2, s. 2.26.]

Verrattuna kokovakokäämitykseen murtovakokäämityksellä on mahdollista lyhentää vyyhden pään pituutta ja näin pienentää johdinkuparissa syntyviä häviöitä.

Taulukko 2. käämityksien ominaisuuksia [3, Taulukko 3.3, s68]

Slots	Poles											
$Q_s = 12$	8	10	12	14	16	20	22	24	26	28	30	42
q	0.5	0.4		0.29	0.25	0.2	0.18	0.17	0.15	0.143	0.13	
T_{max}/T_n (p.u.)	1.66	1.66		1.17	1.0							
ΔT_{p-p} (%)	16	2.5		7.5	13							
$Q_s = 18$			12	14	16	20	22	24				
q			0.5	0.43	0.38	0.3	0.27	0.25				
T_{max}/T_n (p.u.)			2.1	1.79								
ΔT_{p-p} (%)			16	6.5								
$Q_s = 24$					16	20	22		26	28		
q					0.5	0.4	0.36		0.31	0.286		
T_{max}/T_n (p.u.)					2.0	1.79	1.56		1.0	1.3		
ΔT_{p-p} (%)					8	2.5	6		>50	3		
$Q_s = 36$								24	26	28	30	42
q								0.5	0.46	0.429	0.4	0.286
T_{max}/T_n								1.73			1.53	1.0
ΔT_{p-p} (%)								3.5			2	1

Taulukossa slots (Q_s) tarkoittaa uralukua ja poles napalukua, T_{max}/T_n tarkoittaa maksimimomentin suhdetta nimellismomenttiin ja ΔT_{p-p} momentin säröä prosentteina nimellismomentista

Taulukossa 2 on vertailtu eräiden ura- ja vakolukuyhdistelmien ominaisuuksia, kun vakoluku on enintään 0,5. Taulukkoa voidaan lukea laajempaan kertomalla sekä ura-, että napaluku jollakin kokonaisluvulla.

7 2-KERROSLIMIVYYHDEN VALMISTUS

Nykypäivän tehokkaat sähkökoneet ovat lähes poikkeuksetta valmistettu muotolangasta käämityistä vyyhdeistä. Tällöin uran täytekerroin on mahdollisimman hyvä. Lisäksi lämmön johtuminen staattorin levypakettiin on tehosta. Tyypillisesti käämitys on rakenteeltaan kaksikerroslimikäämitys.

Ensin muotokuparilangasta kelataan vyyhtiaihio. Kelaus tapahtuu joko yhdellä tai useammalla langalla.



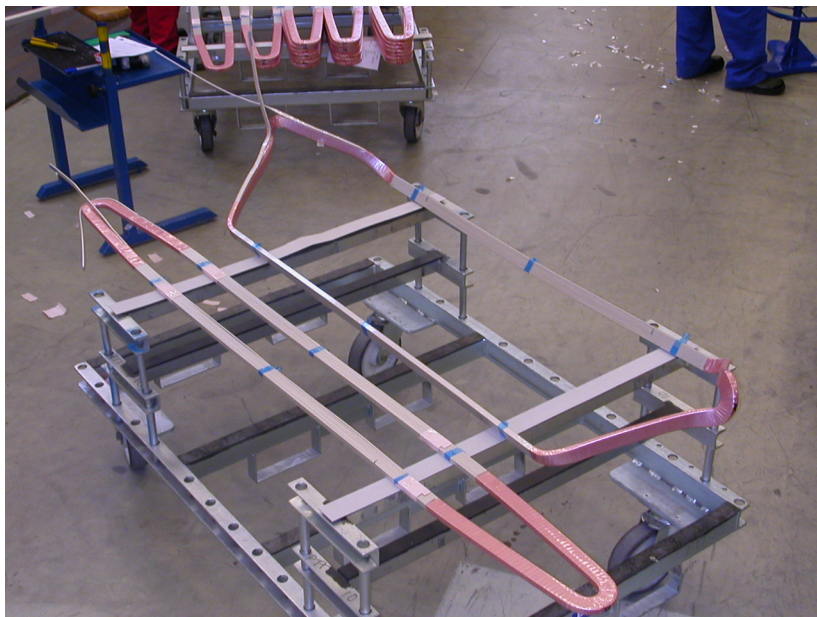
Kuva 17. Vyyhtiaihion kelaus

Kelattu vyyhtiaihio valmistellaan levitystä varten.



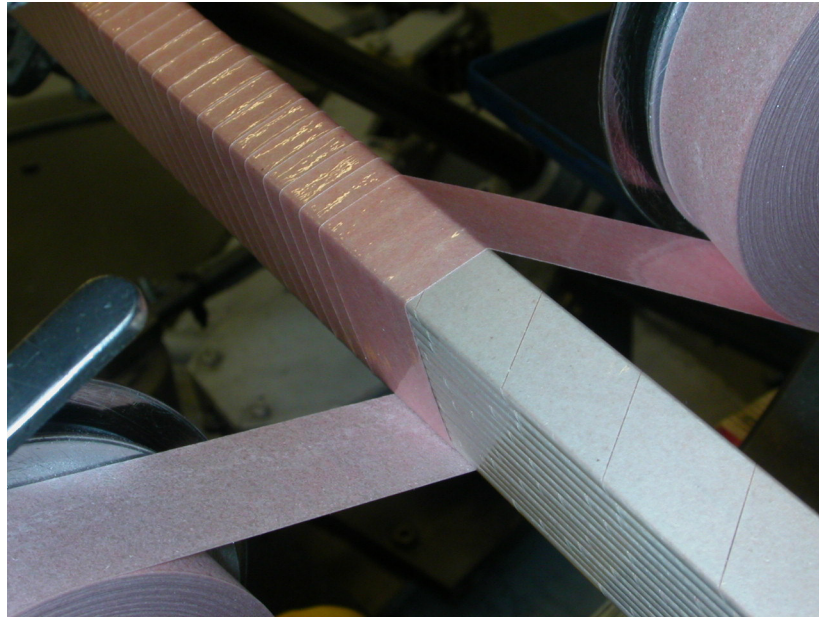
Kuva 18. Vyyhtiaihion valmistelu levitystä varten

Levityksessä vyyhtiaihio saan oikean muodon.



Kuva 19. vasemmalla vyyhtiaihio ennen levitystä ja oikealla levityksen jälkeen

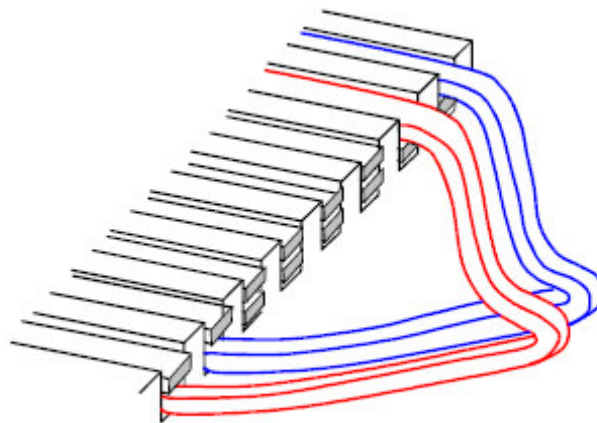
Levityksen jälkeen syntyneen vyyhden sivut eristetään koneellisesti riittävän monella eristekerroksella, käyttöjännitteestä riippuen.



Kuva 20. Vyyhden eristys

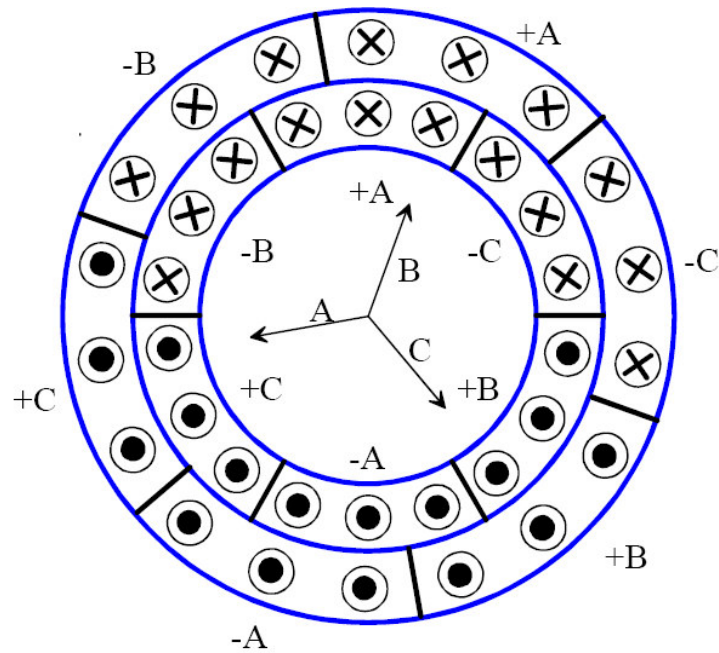
8 STAATTORIN KAKSIKERROSLIMIKÄÄMINTÄ

Kaksikerroslimikäämityksessä vyyhdellä on sekä pohjasivu, että pintasivu. Yhdessä urassa on kahden eri vyyhden pinta- ja pohjasivu päällekkäin. Lisäksi eri vyyhtien sivut ovat toisiinsa nähden limittäin.



Kuva 21. kaksikerroslimikäämitys piirrettynä tasoon [2, s. 2.13]

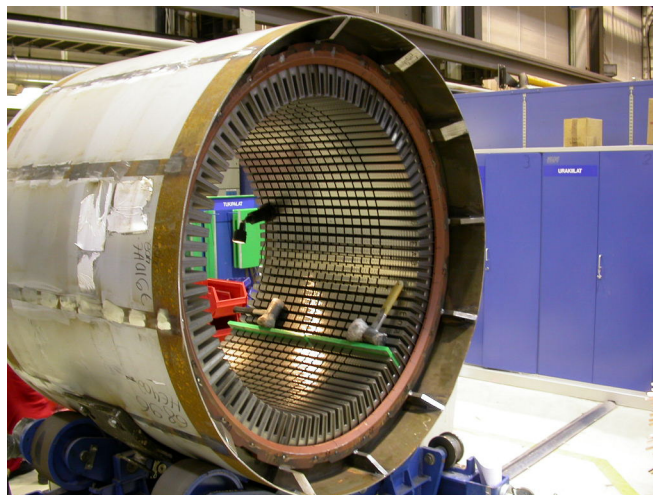
Kuvasta 21 voidaan nähdä miten vyyhdet asennetaan limittäin. Lisäksi kuvasta nähdään miten vyyhden pohja- ja pintasivut sijoittuvat toisiinsa nähden.



Kuva 22. kaksikerroslimikäämityksen magneettikentät [2, s. 2.13]

Kuvassa 22 nähdään vyyhtien sijoittelu. Kuvan koneessa: uraluku (Q)=18, vakoluku (q)=3, napapariluku (p)=1 ja vyyhtien leveys (W)=8/9. Vyyhtiryhmät on nimetty helpottamaan tarkastelua.

Staattori voidaan käämiä joko vaaka- tai pystyasennossa. Valittu asento riippuu staattoripaketin mitoista ja ulkokehän rakenteesta.



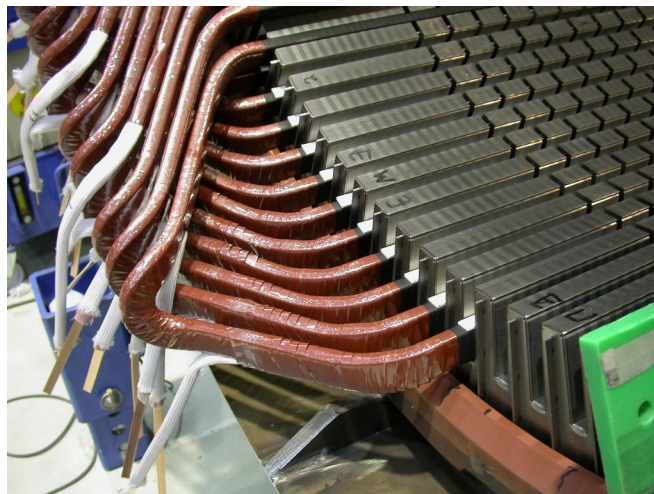
Kuva 23. Tahtikoneen staattori ennen vyyhtien asennusta.

Kaksikerroslimikäämityksessä käämintä aloitetaan siten, että askeleen pituudesta riippuen ensimmäisistä vyyhteistä jätetään pintasivut lyömättä uraan.

Tämä mahdollistaa lopetuksessa pohjasivujen asentamisen niiden alle. Viimeisenä uraan lyödään ensimmäisenä asennettujen vyyhtien pintasivut.



Kuva 24. Vyyhdin asennus uraan



Kuva 25. Vyyhtiaskel

Kuvassa 25 koko askel on täynnä ja ensimmäinen pintasivu on lyöty pohjaan asti. Uransuussa valkoisena näkyy myös vyyhdensivujen väliin tuleva välitäyte. Vyyhtien uraan asentamisen jälkeen ne kytketään sähköisesti toisiinsa eli valmistetaan kytkentä. Valmis kytkentä ja vyyhdit tuetaan sidoksella, jonka jälkeen staattori on valmis kyllästettäväksi.

9 PROTOTYYPPIKONEEN MURTOVAKOVYYHDIN KEHITYS

Vyyhdin valmistuksen lähtökohtana olivat koneesta tehdyt laskelmat. Laskelmien pohjalta oli päädytty tiettyyn ura- ja napalukuun. Lisäksi runkokoko ja levypaketin pituus oli ennalta päätetty.

Ensisijainen tavoite oli saada valmistettua vyyhtejä joiden askel olisi yksi. Tässä vaiheessa oli jo tavoitteena valmistaa vyyhdet kiille-eristetyistä muotokuparista, jolloin myös johdineristeen käyttäytymiseen kuparin ohella piti kiinnittää huomiota.

Kokeiluja varten valmistettiin yhden segmentin levyinen osa staattoripaketista. Tällöin olisi helppoa kokeilla erilaisia vyyhtimalleja ja -rakenteita.

9.1 Litz-lankavyyhdet

Litz-lanka vastaa rakenteeltaan ohuista säikeistä valmistettua kerrattua johdinta. Riippuen halutuista ominaisuuksista lanka voi olla eristettyä tai eristämätöntä. Litz-langan käyttö rajoittuu tyypillisesti suuritaajuisiin sovelluksiin, joissa sen paremmat taajuusominaisuudet ovat eduksi. Täytekertoimen osalta sen ominaisuudet ovat samaa luokkaa kuin pyörölangalla yleensä.

Eräs valmistaja toimitti litz-langasta valmistettuja näytevyyhtejä kokeiluja varten. Näytevyyhdet olivat rakenteeltaan napakäämejä, Tällöin vyyhdin kierrokset kiertävät vain yhtä levypaketin hammasta. Lisäksi vyyhdet oli valmistettu käämittäväksi yhteen tasoon. Kerratun rakenteen vuoksi uran täytekeroiroin jää pienemmäksi kuin muotokuparijohdinta käytettäessä. Litz-langan taajuusominaisuuksista ei tässä koneessa ollut hyötyä, joten kiinnostavampi johdinmateriaali on muotokupari. Näytevyyhdeistä voi kuitenkin hyvin nähdä vyyhden pään rakenteen, johon muotokuparillakin tulisi pyrkiä.



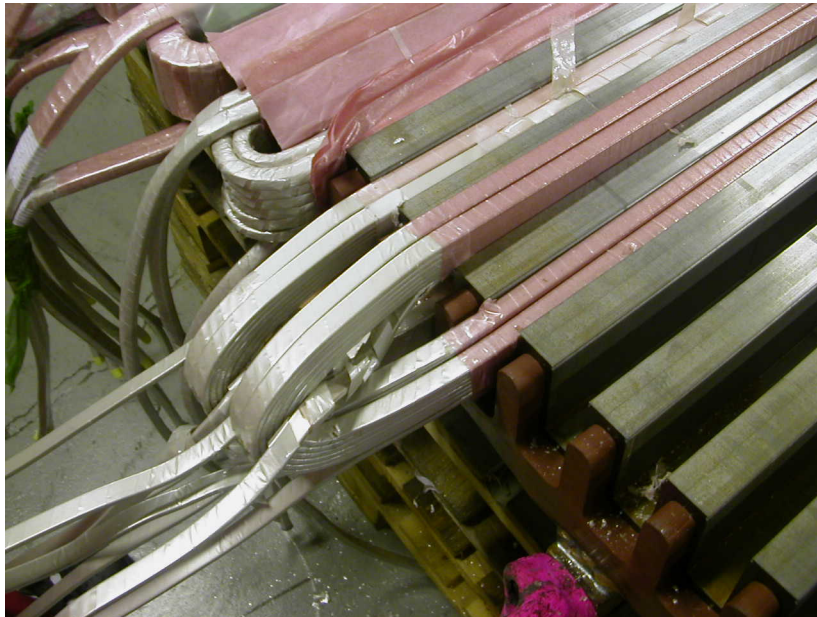
Kuva 26. koekappale

Kuvassa 26 nähdään kokeiluja varten valmistettu staattorikehän osa sekä Litz-langasta valmistettuja vyyhtejä.

9.2 Kaksikerroslimikäämityksen kokeilu

Ensimmäisissä kokeissa tutkittiin mahdollisuutta valmistaa kone kaksikerroslimivyyhdein. Tällaisten vyyhtien valmistus pitäisi periaatteessa olla helpointa nykyisellä konekannalla. Vyyhdin tavallista lyhyempi askel kuitenkin aiheutti valmistuksessa runsaasti ongelmia ja eristeen rikkoontumista oli hyvin vaikea välttää.

Valmistuksen lisäksi käämintä oli erittäin vaativaa. Tähän olisi kokemus varmasti tuonut helpotusta, mutta lyhyen askeleen vuoksi pienetkin vaihtelut levytyksessä olisivat merkittävästi lisänneet eristeiden rikkoontumisriskiä.



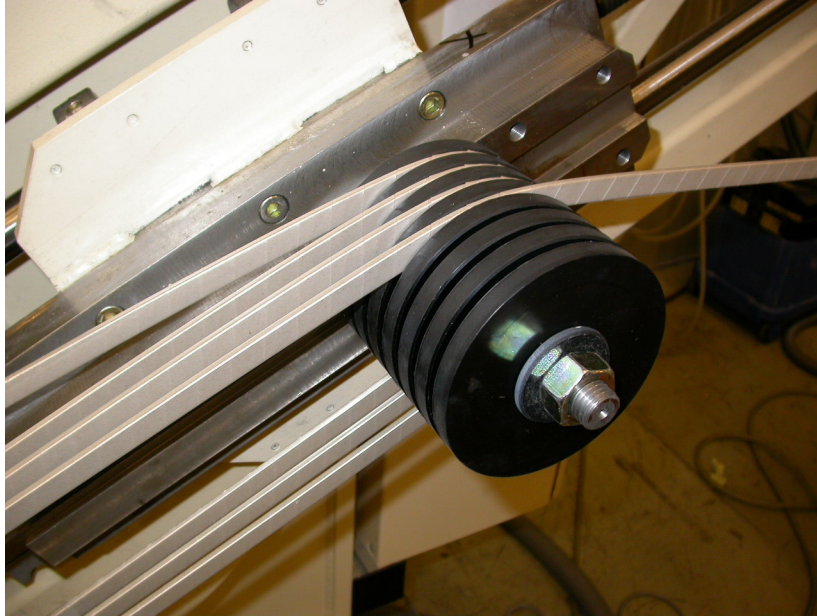
Kuva 27. Kaksikerroskoevyyhdyt

Kuvassa 27 nähdään kaksi kaksikerroslimivyyhteä. Lisäksi kuvasta voidaan hyvin nähdä, kuinka paljon pidempi vyyhden päästä tulee verrattuna litz-langasta valmistettuun napakäämiin.

9.3 Kelauskoe muotolangalla

Tutkittaessa mahdollisuutta valmistaa muotolangasta samanlaisia vyyhtejä kuin litz-langasta valmistetut koevyyhdyt, suoritettiin muotolangalla kelauskokeit.

Kelauskokeessa lanka syötettiin pystyasennossa ja kelattiin normaalilla tuotannon kelauskoneella erityisesti tarkoitusta varten valmistettujen lestien päälle. Taipumiseen tarvittava voima tuotettiin jarruttamalla syöttävää kelaa riittävän suurella voimalla.

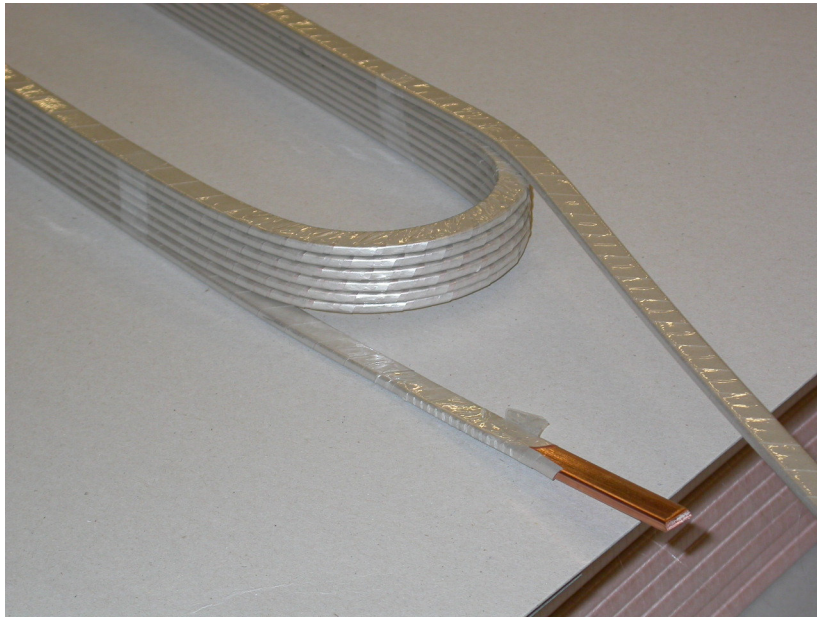


Kuva 28. Kelauskoe

Kelauskokeita suoritettiin useille erikokoisille lesteille. Tarkoituksena oli selvittää kuinka pienelle säteelle kupari voidaan kelaamalla muokata. Muokkau-
tumista rajoittavaksi tekijäksi muodostui voiman puute. Kelajarrun voimaa ei saatu riittävän suureksi, jotta kupari olisi saatu taipumaan pienelle halkaisijalle.

Kokeissa havaittiin, ettei jo olemassa oleva konekanta ja nykyiset menetelmät sellaisenaan sovellu tehtävään, vaan vyyhtiaihion kelaus jouduttaisiin tekemään kokonaan uudella tavalla.

Kokeen tulokset olivat kuitenkin varsin rohkaisevia. Silmämääräisesti tarkasteltuna eristeessä ei näyttänyt olevan vaurioita. Voidaan jopa sanoa, että johdineriste käyttäytyi yllättävän hyvin tämän suuntaisessa taivutuksessa.

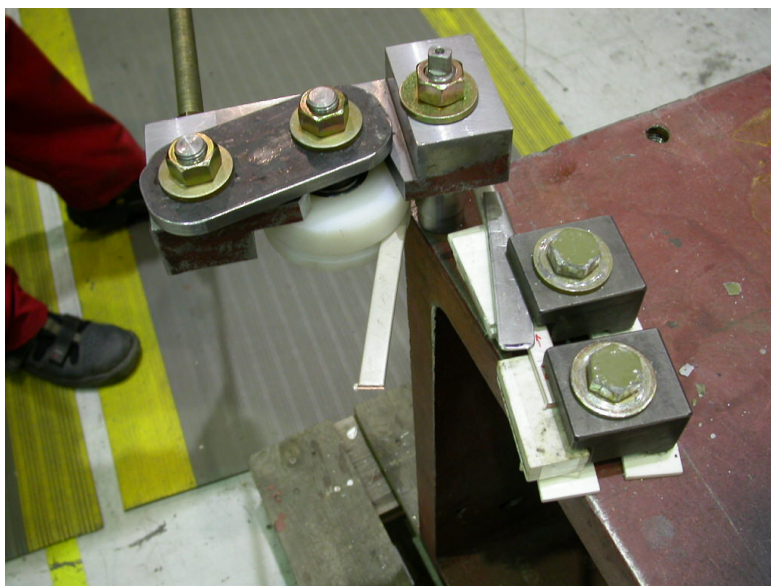


Kuva 29. Kelauskoneella valmistettu aihio

9.4 Taivutuskoe muotolangalla

Kelauskokeen tuloksista todettiin, ettei kelaamalla voida saavuttaa lopullista taivutussädettä. Kuitenkin taivuttaminen lestin ympärille voisi olla mahdollista käyttäen taivutuksen ja valssauksen yhdistelmää. Tällöin voisi olla mahdollista saada riittävästi voimaa, jotta riittävän pienisäteinen taivutus olisi mahdollinen.

Tämän johdosta valmistettiin taivutuskoneen prototyyppi, jolla olisi mahdollista kokeilla taivutuksia erilaisilla asetuksilla.



Kuva 30. Taivutusväline

Taivutuksessa kuparista johdinta painetaan taivutusakselia vasten ja samalla tuetaan sitä. Tällöin oli mahdollista saada aikaan varsin pieni säteinen taivutus, ilman että taipumista syntyy ei-toivotussa suunnassa.



Kuva 31. Taivutuvälineellä valmistettu koekappale

Tulokset olivat rohkaisevia, eikä johdineristeen suoranaista repeytymistä ollut havaittavissa. Tulosten johdosta ryhdyttiin kehittämään taivutusta ja selvittämään mahdollisuutta valmistaa koko vyyhti taivuttamalla.

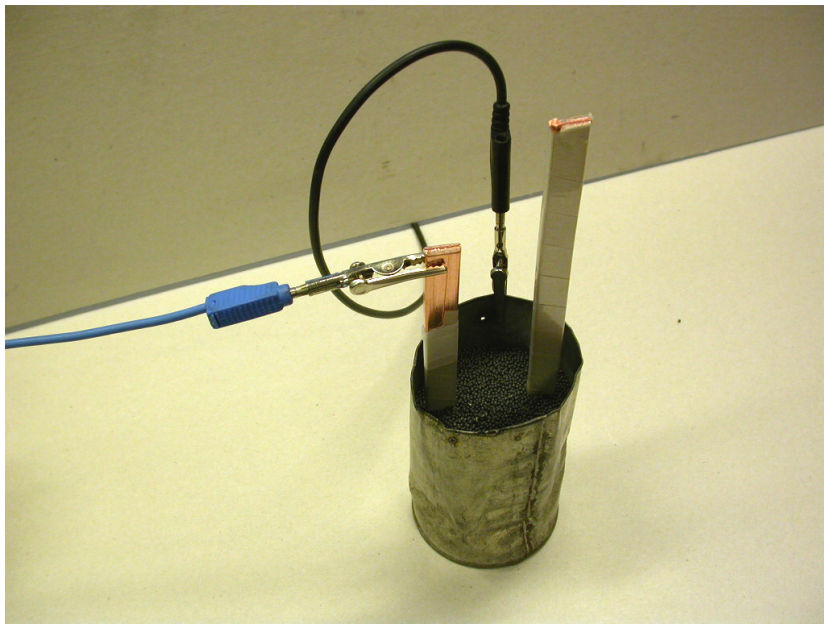
9.4.1 Haulikylpykoestus

Taivutusten tuloksista tutkittiin miten johdineriste oli selvinnyt muokkauksesta. Tämä tehtiin suorittamalla koekappaleille jännitekoetta haulikylvyssä. Koestustapa on määritelty IEC-normissa 60851-5. Haulikylpykoestuksessa tutkittava kappale asetetaan johtavasta materiaalista valmistettuun astiaan ja ympärille jäävä tyhjä tila täytetään johtavasta materiaalista valmistetuilla, riittävän pienillä hauleilla. Jännitelähde kytketään koekappaleen johtimen ja astian välille.

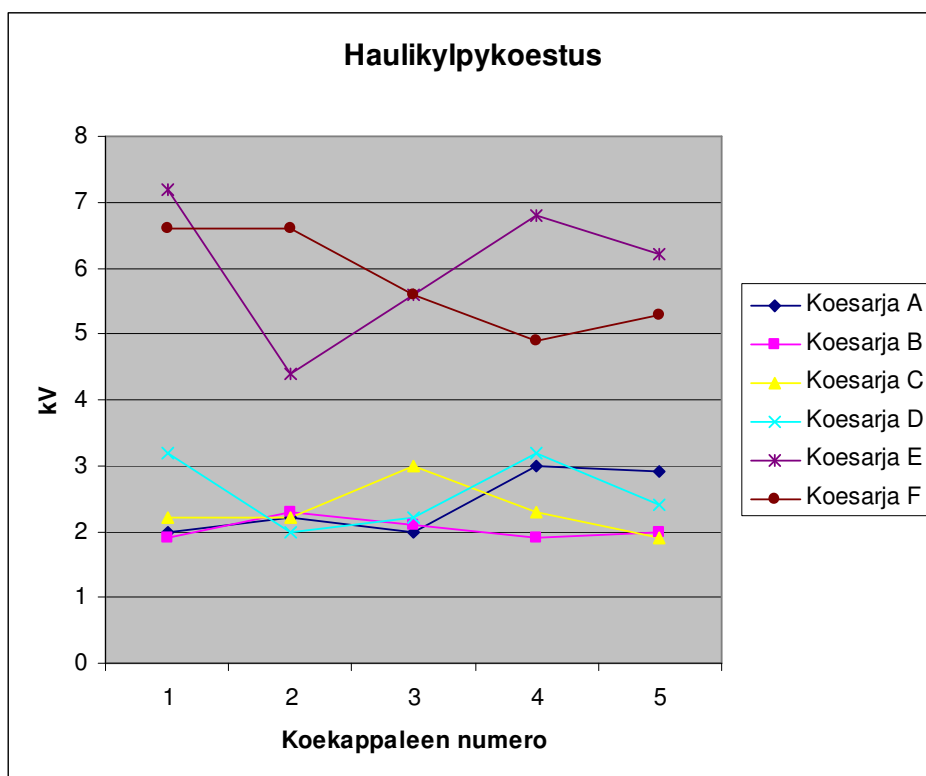
Jännitettä nostettiin, kunnes läpilyönti saatiin aikaiseksi.



Kuva 32. Haulikylvyn valmistelu



Kuva 33. Koekappale haulikylvyssä



Kuva 34. Haulikylpykoestuksen tulokset

Sarjat A – D olivat taivutettuja kappaleita ja E ja F taivuttamattomia. Jokainen sarja sisälsi viisi koekappaletta.

Taivuttamattomat sarjat koestettiin siten, että johtimen ympärille kiedottiin tiukasti ohutta alumiinifoliota ja koestusjännite kytkettiin johtimen ja folion väliin.

Tuloksista voidaan selvästi havaita, että taivutus vaikuttaa johdineristeen lämpilyöntilujuuteen. Heikentyminen johtuu kovan pintapaineen ja samalla vaikuttavan kiertoliikkeen aiheuttamasta johdineristeen rypistymisestä. Rypistyneen johdineristeen kiille murtuu, jolloin sen jännitelujuus heikkenee. Heikentyneenäkin johdineristeen jännitelujuus on kuitenkin tähän sovellukseen riittävä.



Kuva 35. Kuvassa ympyröitynä läpilyöntijälki

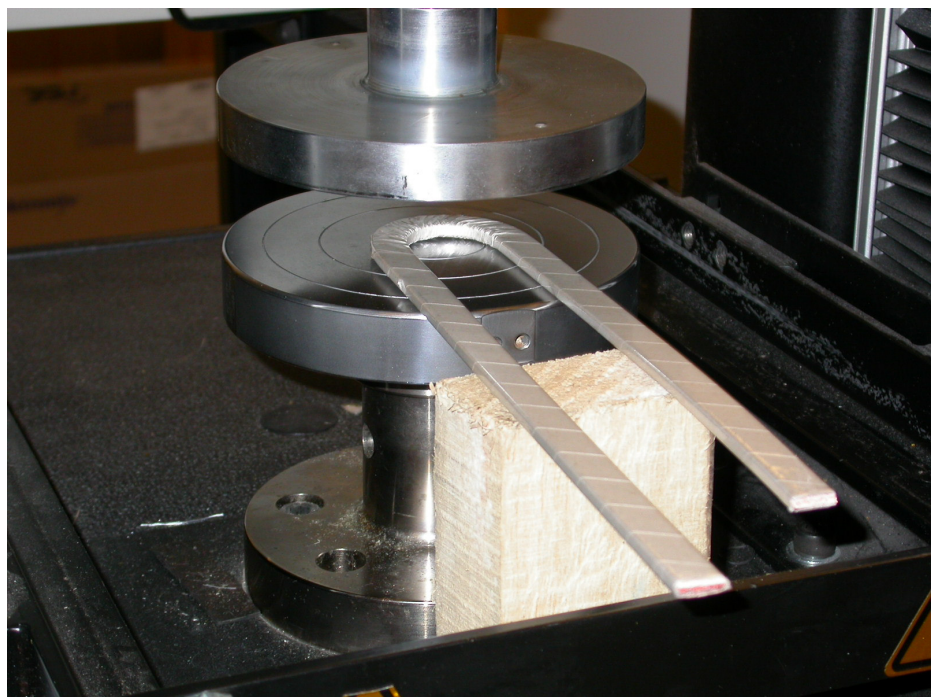


Kuva 36. Palojälki kuvattuna lähempää.

9.4.2 Puristuskoe

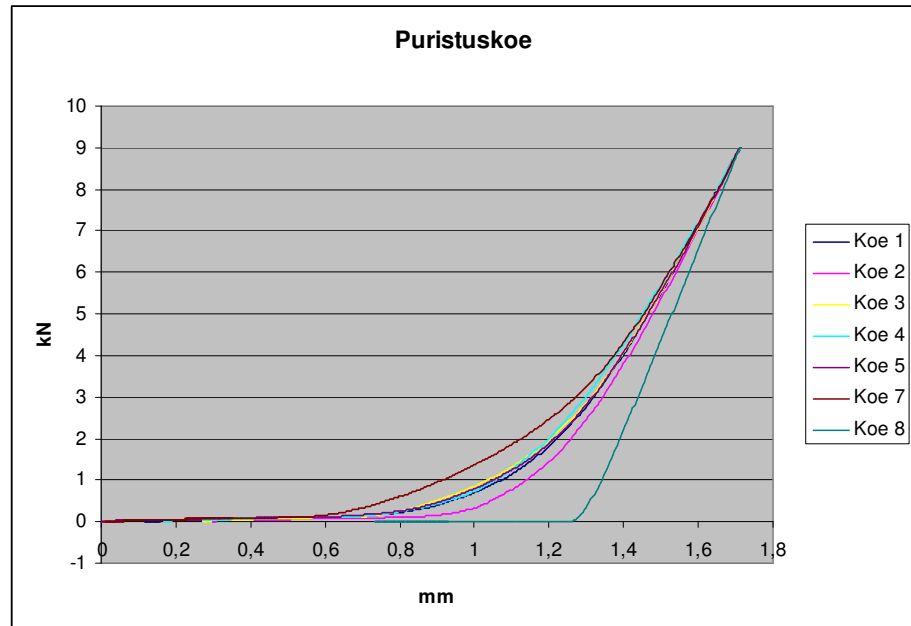
Taivutuksen aikana kupari muokkautuu siten, että ulkokehällä tapahtuu aineen venymisen myötä ohenemista ja sisäkehältä tyssääntymisen myötä paksuuntumista. Kierrokset ovat kuitenkin urassa tiiviisti toisiaan vasten, joten vyyhden pään alueella tapahtuvat muodonmuutokset eivät ole toivottavia.

Vetokoneessa tutkittiin mahdollisuutta ohentaa paksuuntunutta kohtaa puristamalla. Vetokone asetettiin puristamaan koekappaletta kahden tasomaisen leuan välissä.



Kuva 37. Puristus vetokoneella

Vetokone mittaa leukojen puristusvoimaa aseman funktiona. Näin syntyvä tulos on siis kuvaaja, jossa x-akselilla on leukojen liike ja y-akselilla vaikuttava voima. Tuloksista on mahdollista tulkita, paljonko voimaa tarvitaan kuparin puristamiseksi alkuperäiseen mittaan.



Kuva 38 Puristuskokeen tulokset

Kokeen tuloksista voidaan nähdä, paljonko voimaa tarvitaan tietyn suuruisen siirtymän aikaan saamiseksi. Viimeinen puristus (koe 8) on tehty ilman koe-kappaleita, jolloin voidaan nähdä koneen vaikutus tuloksiin. Mitä pehmeämpi koekappale on, sitä loivemman käyrän se synnyttää.

Puristuksen vaikutusta eristykseen tutkittiin tavanomaisella hydraulisella puristimella. Puristus järjestettiin siten, että oli mahdollista syöttää koestusjännite johtimen ja puristavan metallisen pinnan välille. Tällöin havaittiin, että jo hyvin pienillä puristusvoimilla eriste rikkoutuu ja aiheuttaa läpilyönnin.

Kokeen lopputuloksena voidaan todeta, ettei vyyhdin päätä voida puristamalla palauttaa takaisin alkuperäiseen mittaan ilman, että eriste vaurioituu.

9.5 Koevyyhtien valmistus ja koestus

Taivutuskoneella valmistettiin koe-erä vyyhtejä, jotka eristettiin ja sen jälkeen kyllästettiin tuotannossa normaalisti. Lopuksi valmiille vyyhdeille suoritettiin jännitekokeita. Kierroseriste tutkittiin syöksyaaltokoestuksella ja uraeriste 50 Hertzin jännitekokeella. Lisäksi vyyhden pään osalta mitattiin kierrosten välistä eristysvastusta vesialtaaseen upotettuna.

9.5.1 Syöksyaaltokoestus

Vyyhdin kierrosten välinen eristys mitattiin syöksyaallolla IEC normin 60034-15 mukaisesti.

Syöksyaaltokoestuksessa koestuslaitteen suurjännitekondensaattorit ladataan rinnakkain haluttuun jännitteeseen ja puretaan pallokipinävälin avulla sarjassa vyyhdin johtimeen. Tällä tavalla saadaan jännite vyyhdin johtimessa nostettua hyvin nopeasti. Kondensaattorien jännite muodostaa nopean jänniterintaman, joka etenee vyyhdin johdinta pitkin ja jänniterasitus koestaa kierrosten välisen eristyksen.

Syöksyaaltokoestuksen tulos on luonteeltaan kertailmiö vyyhdin jännitekuvaajasta aallon vaikuttaessa vyyhdissä. Tulosten tallentamista varten vyyhdin jännitettä mitattiin digitaalisella muistioskilloskoopilla. Tällöin oli helppo asetella sopivat liipaisuehdot ja saada jännitekuvaaja talletettua oskilloskoopin muistiin. Mahdollinen kierrosoikosulku näkyy käyrän laskevan reunan muodossa. Syöksyaaltokoestuksen mittaustulosten tulkinta on haasteellista ja vaatii kokemusta, koska pieni läpilyönti ei välttämättä ole helposti havaittavissa käyrästä.

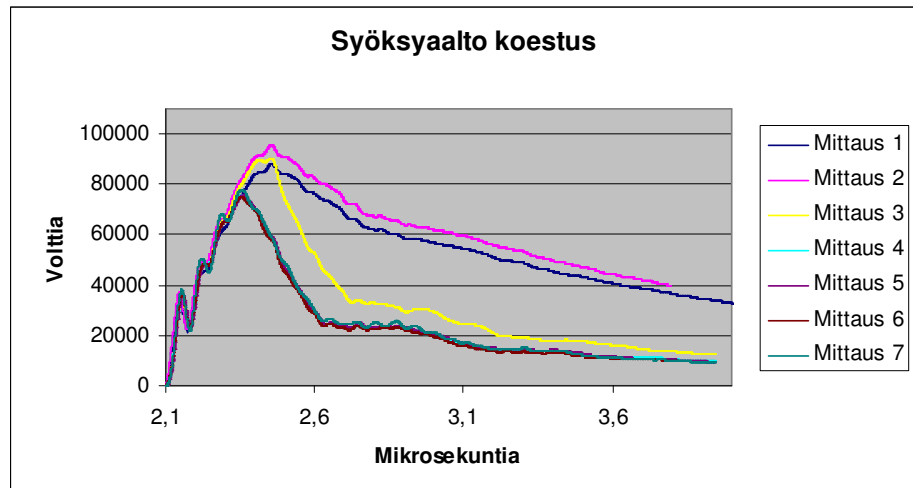


Kuva 39. Syöksyaaltokoestus

Kuvassa 39 nähdään syöksyaaltokoestuslaitteen mittausrjestely. Edessä oikealla, eristävällä alustalla on mitattava kappale. Takana voidaan nähdä

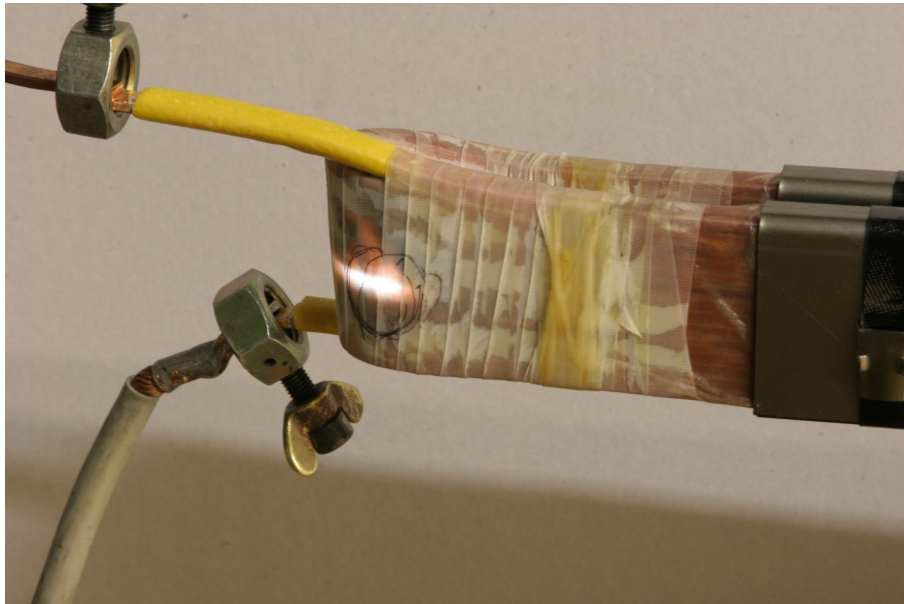
pallokipinävälin pallot ja suurjännitekondensaattorit. Vasemmalla nurkassa on suurjännitemuuntaja.

Syöksyaaltokoestuksen jännitettä nostettiin 5 kV:n portaittain siten, että jokaisella portaalla koestus suoritettiin neljä kertaa. Jännitettä nostettiin niin korkealle, että kierrosoikosulku saatiin aikaiseksi.



Kuva 40. Syöksyaaltokoestuksen tuloksia

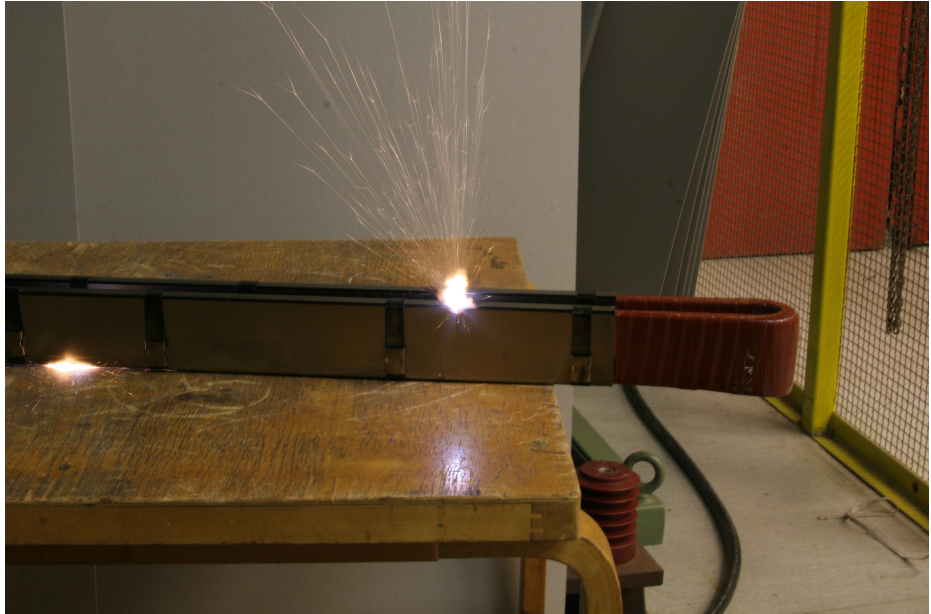
Kuvassa 40 nähdään kierrosoikosulun vaikutus jännitekuvaajaan. Ensimmäinen ja toinen koestus (mittaus) on sujunut ilman läpilyöntiä, mutta kolmannessa voidaan jo havaita kierrosoikosulun aiheuttama selvä muutos käyrässä. Kierrosoikosulku polttaa kierrosten välille johtavan hiilisillan, josta jännite pääsee helposti lyömään läpi. Tämän vuoksi lisäkoestukset (mittaus 4-7) eivät juuri muuta käyrää.



Kuva 41. Lämpilyönti vyyhden päässä



Kuva 42. Palojälki vyyhden päässä



Kuva 43. Lämpilyönti suoralla osalla

Kuvassa 43 nähdään lämpilyönti kahdessa eri kohdassa, ensin vyyhdestä metalliseen puristusrautaan ja siitä takaisin vyyhteeseen. Vyyhdin ollessa eristävällä alustalla, metallisen tukiraudan ja vyyhdin johtimen välillä ei ole jännite-
rasitusta.



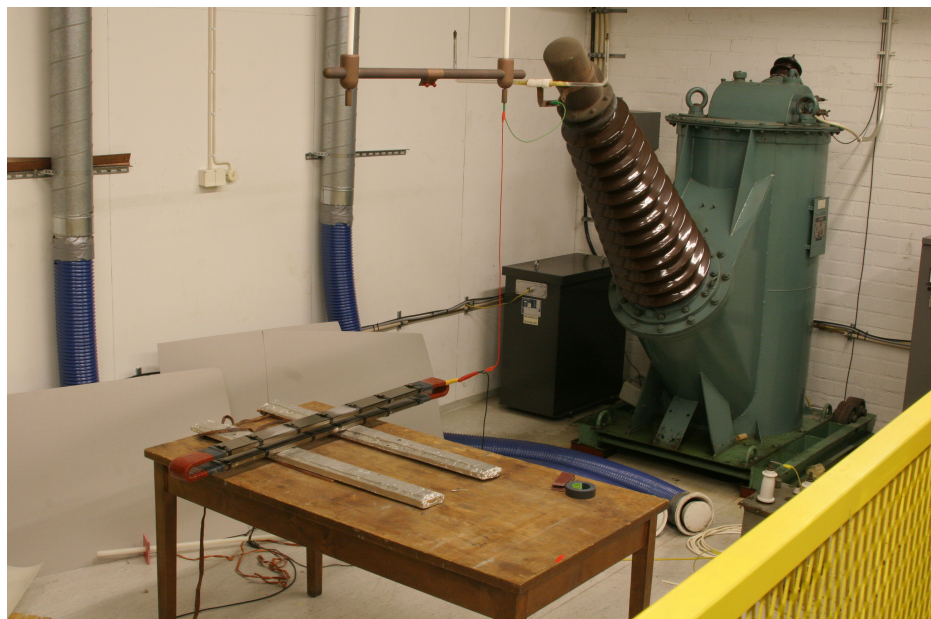
Kuva 44. Vyyhdensivun palojälki

Syöksyaaltokoestuksessa haluttiin erityisesti tutkia vyyhden pään eristyksen kunto. Vyyhdin taivutuksessa johdineriste joutuu taivutusakselin ja kuparijohdinten välissä kovaan paineeseen ja joutuu samalla taipumaan akselin ympäri. Rikkoutuminen on hyvin todennäköistä, mikäli johdin pääsee taivutuksen aikana liikkumaan. Lisäksi kuparin muokkauksen johdosta syntyneet kulmat saattavat rikkoa kiille-eristeen.

Yhteenvetona syöksyaaltokoetuksesta voidaan todeta, että vyyhden johdineriste kesti sille asetetut vaatimukset.

9.5.2 Jännitekoete uraeristeelle

Vyyhdin uraeristeen kuntoa tutkittiin 50 Hertzin jännitekoeteella. Jännitekoete noudattaa IEC 60034-15 normia. Koetusjännite kytkettiin vyyhden johtimen ja toisen metallisen tukiraudan väliin. Vyyhdistä on tällöin mahdollista koettaa molemmat sivut erikseen.



Kuva 45. Uraeristeen koetusjärjestely

oikealla takana nähdään suurjännitemuuntaja ja etualalla koestettava vyyhti eristävällä alustalla.

Koestuksessa maadoittamattoman vyyhdensivun pinta nousee samaan jännitteeseen kuin vyyhdin kuparijohdin. Tämän vuoksi jouduttiin vyyhdin sivujen väliin laittamaan koestuksen ajaksi lisäeristettä, joka estää läpilyönnin ilmassa sivujen välissä.

Koestuksessa jännitettä nostettiin, kunnes läpilyönti saatiin aikaiseksi metalliseen tukirautaan.

Taulukko 3 Jännitekokeen tuloksia

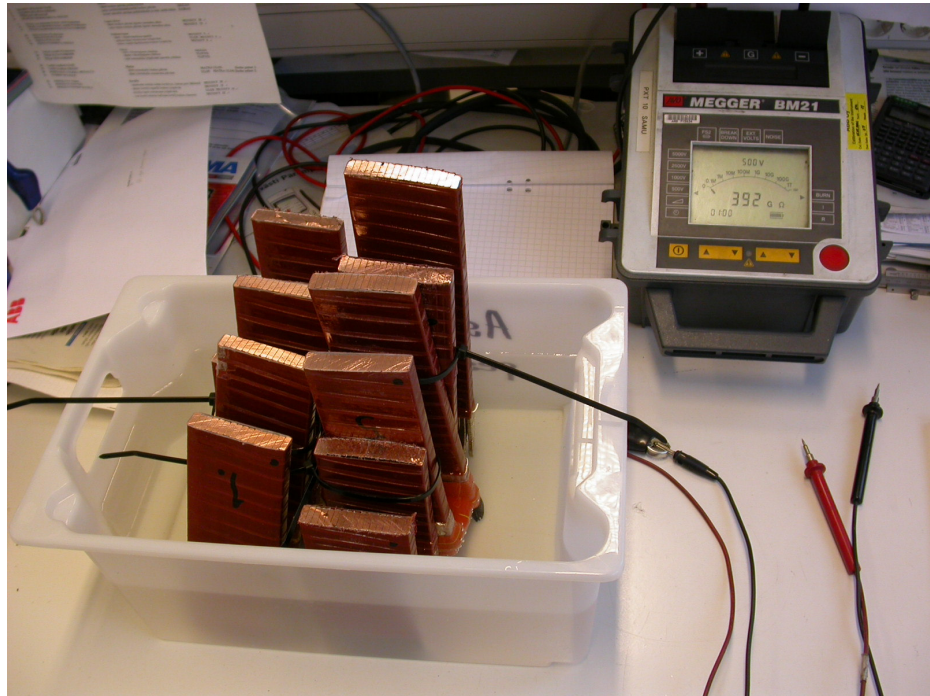
Vyyhti	Sivu	Läpilyöntijännite [kV]
1	A	22,5
	B	20
2	A	22,5
	B	21,6

Tulokset osoittivat, että uraeristeet olivat säilyneet ehjinä.

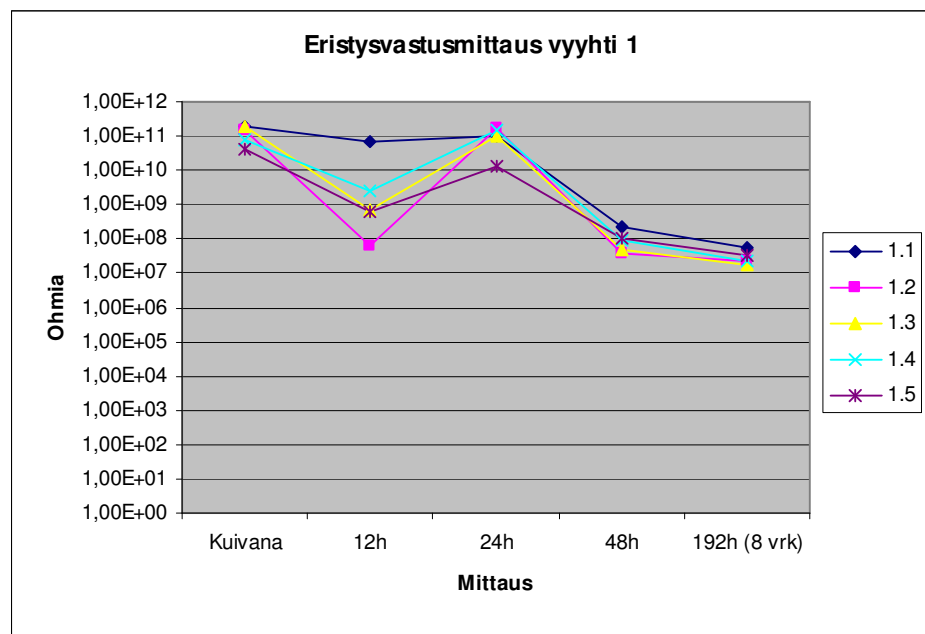
9.5.3 Vyyhden pään Eristysvastusmittaus

Syöksyaaltokoestuksessa tutkittiin vyyhdin kierrosten välinen eristys. On kuitenkin mahdollista, että kelausvaiheessa johdineriste on rypistymisen myötä jättänyt johtimeen paljaita kohtia. Näiden reikien kautta voi myöhemmin, kosteuden ja lian myötä syntyä vyyhdin pintaa pitkin kulkevia vuotovirtoja ja jopa kipinöintiä.

Eristyksen vesitiivyyttä tutkittiin sahaamalla vyyhdin pää irti ja upottamalla se astiaan johon kaadettiin tavallista vesijohtovettä. Vesijohtovesi sisältää epäpuhtauksia ja erilaisia suoloja, joten se on eristysvastusmittauksen kannalta varsin hyvä johde. Sahatusta pinnasta oli helppo mitata eri kierrosten välistä eristysvastusta ja näin selvittää, onko eristys vesitiivis. Tällä mittausselmällä voidaan selvittää vierekkäisten kierrosten välisen eristyksen kunto, joka normaalissa käyttötilanteessakin on kriittisin, koska matka on tällöin lyhin.



Kuva 46. Vyyhdenpään eristysvastusmittaus



Kuva 47. Erään vyyhdenpään mittaustulokset

Ensimmäinen mittaus vyyhden päälle tehtiin kuivana, toinen 12 tunnin, kolmas 24 tunnin, neljäs 48 tunnin ja viides 192 tunnin, eli kahdeksan vuorokauden jälkeen vesiastiaan upottamisesta.

Tuloksista voidaan havaita eristysvastuksen käyttäytyminen. Hieman yllättävää on vastuksen suureneminen 24 tunnin kohdalla, mutta muuten tulokset olivat varsin odotettavia. Vielä kahdeksan vuorokauden jälkeenkin eristysvastus oli yli 10 megaohmia, mitä voidaan pitää riittävän suurena arvona.

Eristysvastusmittausten perusteella voidaan varmuudella sanoa, että johdineriste säilyy vesitiiviinä.

10 PROTOTYYPPIKONEEN VYYHDEN VALMISTUS JA KÄÄMINTÄ

Prototyyppikoneeseen valmistettiin vyyhdet samalla menetelmällä kuten koe-eräkin. Kelausta varten taivutuskoneen prototyyppiä paranneltiin, että vyyhtien tuotantoerä olisi mahdollista valmistaa. Kelauksen, eli taivutuksen jälkeen vyyhdet olivat valmiita eristettäväksi.

Eristetyt vyyhdet olivat sellaisenaan valmiita käämittäväksi, eikä levitystä ole tarpeellista tehdä. Vyyhdin kiertäessä yhtä staattoripaketin hammasta napa-vyyhdin tavoin myös käämintä yksinkertaistuu. Lisäksi mahdollisen vyyhtipalon korjaaminen on yksinkertaisempaa kuin kaksikerroslimikäämityksessä, koska kaikki vyyhdet ovat samassa tasossa.



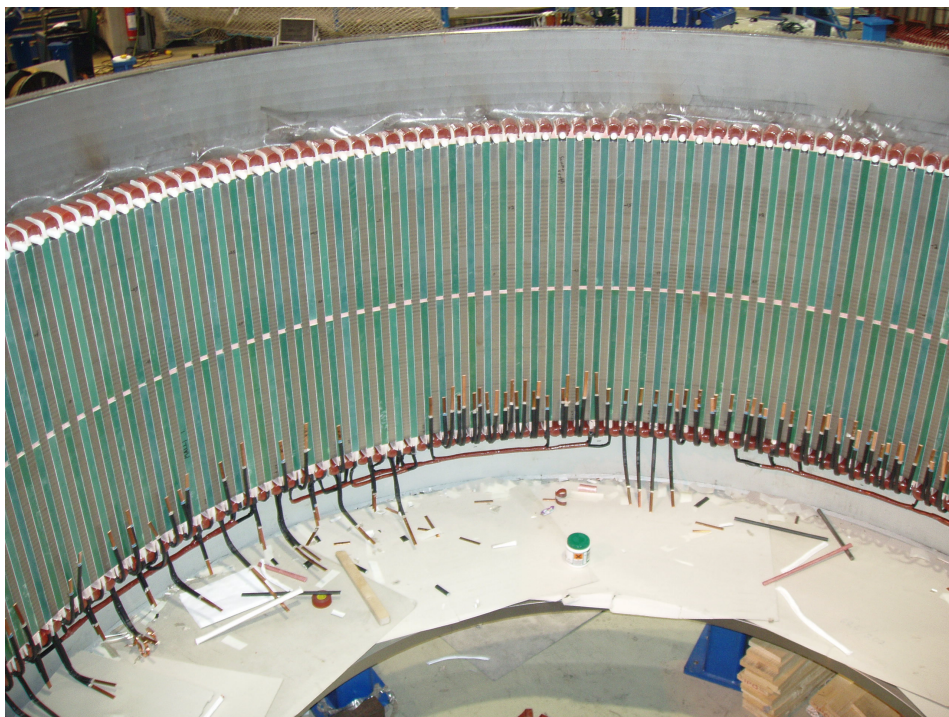
Kuva 48. Prototyyppikoneen vyyhden asennus

Kokonaisuudessaan vyyhden valmistaminen ja käämintä on yksinkertaisempaa kuin perinteisen kaksikerroslimivyyhden. Mikäli tuotantomäärät ovat riittävän suuria, vyyhden kelaus ja eristys on mahdollista automatisoida. Automatisoinnilla voidaan saavuttaa tasaisempi laatu ja tasosta riippuen lyhyempi valmistusaika.

11 YHTEENVETO

Työn päätavoite pystyttiin täyttämään ja vaatimukset täyttävä murtovakovyyhden valmistusmenetelmä löydettiin. Prototyyppikoneen vyyhdet valmistettiin valittujen menetelmien mukaan ja kone käämittiin valmiiksi.

Kääminnän aikana tehtyjen havaintojen pohjalta valittua menetelmää on mahdollista vielä parannella. Toisen prototyyppikoneen kohdalla onkin tarkoitus miettiä seikkoja, joilla valmistusaikaa olisi mahdollista lyhentää sekä helpottaa vyyhtien valmistusta ja käämintä.



Kuva 49. Kuva prototyyppikoneen kääminnystä

LÄHTEET

- [1] Pyökäri Tauno, *sähkökoneoppi*. Tapoila. Weilin+Göös 1971
- [2] Pyrhönen Juha, *Pyörivän sähkökoneen suunnittelu*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 2005.
- [3] Salminen Pia, *Fractional slot permanent magnet synchronous motors for low speed applications*. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. 2003
- [4] Kurronen Panu, *Torque vibration model of axial flux surface-mounted permanent magnet synchronous machines*. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta 2003